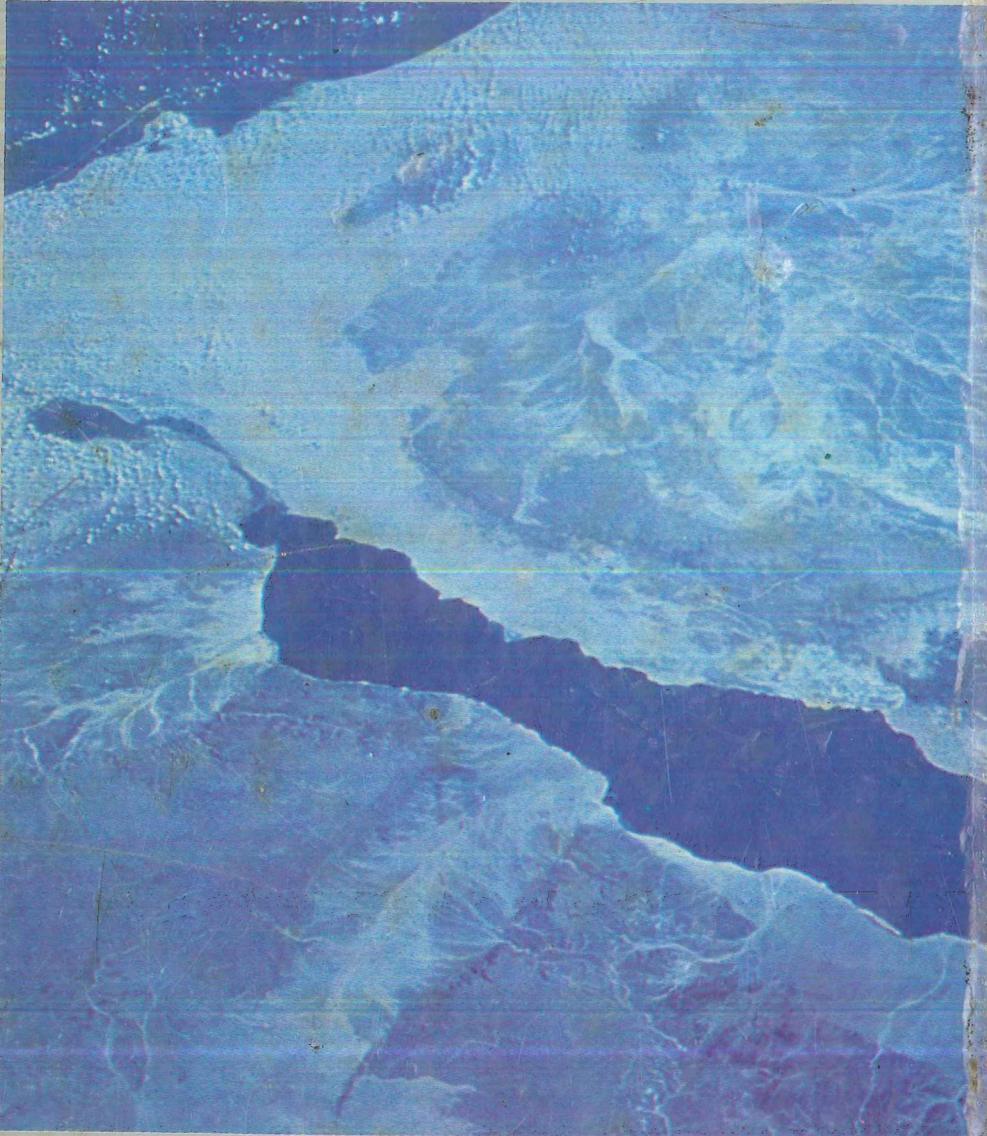


الأرض

مقدمة للجيولوجيا الطبيعية



لوتجنز

ترجمة:

د. عمر سليمان حموده

د. البهلول على اليعقوبى

د. مصطفى جمعه سالم

11



المجالد والتجلد

11



المجلدة كتلة سميكة من الجليد تتكون على سطح الأرض بتراكم ورنم وإعادة تبلر الثلج مع شواهد لحركة في الماضي أو الحاضر. وبالرغم من ان المجالد موزعة على أماكن عديدة من العالم غير أنها عادة ما تقع في أماكن نائية بعيدة عن التجمعات السكانية. وتوجد آلاف المجالد المحدودة المساحة في المناطق الجبلية. وعادة ما يقتصر وجودها على الأودية وتعرف بالمجالد الألبينية (شكل 11 - 1). أما ما يعرف بالمجالد القارية فتختلف عن المجالد الألبينية في حجمها حيث لا يقتصر توزيعها على الوديان الجبلية فحسب ولكنها تغطي مساحات شاسعة من سطح الأرض. ويوجد اليوم كتلتين رئيسيتين للمجالد القارية، إحداهما تغطي مناطق جرينلاند والثانية تغطي جزءاً كبيراً من منطقة القطب الجنوبي (شكل 11 - 2). وتبلغ مساحتهما مجتمعتين حوالى 10 % من سطح اليابسة. والجليد في قارة جرينلاند يغطي حوالى 80 % من مساحتها بكمية قدرها 1.6 مليون كيلومتر مكعب وبمتوسط سمك يبلغ 1500 متر. وبمقارنة جليد جرينلاند مع جليد قارة القطب الجنوبي فان كميته تبدو صغيرة للغاية.

المجالد والدورة المائية

سبق وأن عرفنا أن الماء بالكرة الأرضية في حركة مستمرة فهو ينقل المرة تلو المرة من المحيطات الى الغلاف الجوى ويتساقط على الأرض ثانية ليجرى في أنهار وينساب تحت الأرض تجاه المحيطات وهكذا. غير أن جزءا من الماء المتساقط على شكل ثلوج على المرتفعات العالية أو المناطق القطبية قد يأخذ طريقه داخل الدورة المائية بتسربه الى باطن الأرض أو انسيابه في مجارى على السطح ككتلة جليدية متحركة تعرف بالجليد. ومعلوم أن مصير الجليد الى الذوبان، ومن ثم تكملة مسيرته في اتجاه البحر. غير أن بقائه على حالته المتجمدة قد تستمر عشرات أو مئات بل آلاف السنين أحيانا. فقد أفادت بعض المعلومات التى تم تجميعها عن جليد جرينلاند بأن عمر البعض منه يصل الى 2500 سنة.

المجالد والدورة المائية تكوّن جليد المجالد

حركة المجالد

- معدل حركة المجالد

- محتوى المجالد

التعرية الجليدية

الأشكال الطبوغرافية الناتجة عن التعرية الجليدية

- وديان المجالد

- النتوءات والقرون الجبلية

- صخور أصنام الأغنام

الرسوبيات الجليدية

معالم رسوبيات التلّ

- مورين النهاية والمورين الأرضى

- المورين الجانبي ومورين الوسط

- التلال الجليدية البيضاء

معالم كتل الرسوبيات الطبقيّة الجليدية

- سهول رسوبيات الجليد المنقول وسلاسل

رسوبيات الوديان الجليدية

- رسوبيات خط التلامس مع الجليد

نظرية التجلد والزمن الجليدى

بعض المؤثرات غير المباشرة لمجالد الزمن الجليدى

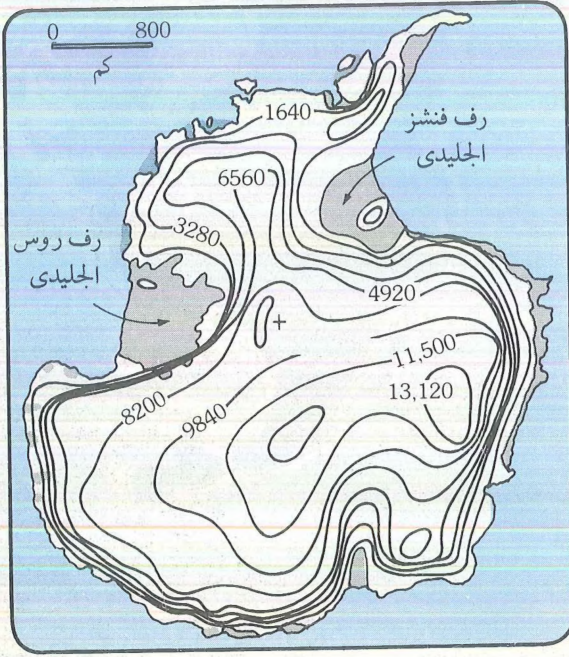
أسباب التجلد

مجلدين البينيين يلتقيان ليكونا ركاما جليديا وسطيا بجبال سانت الياص بمنطقة يوكون.

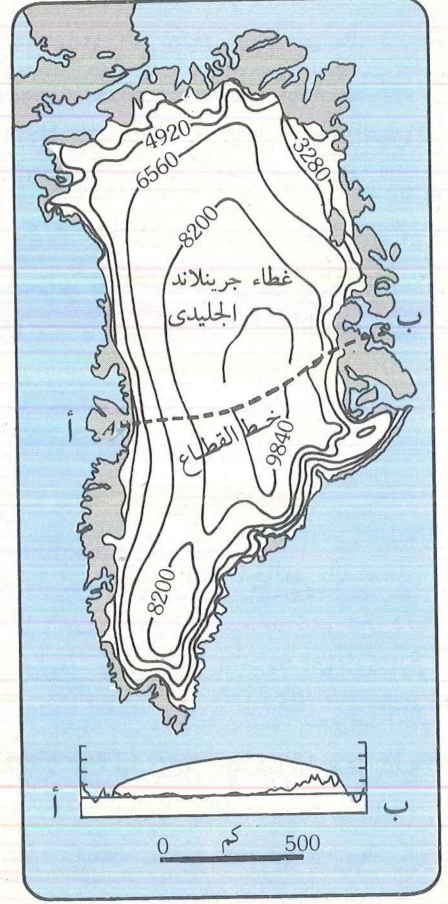


شكل 11 - 1

منظر جوى لمجلد جبال الكاسكيد وهو مجلد ألبينى يبلغ طوله 35 كيلومترا. لاحظ وضوح كل من خط الثلج والتصدعات.



ب



أ

شكل 11 - 2

الصفائح الجليدية. (أ) - بجرينلاند. (ب) - بقارة القطب الجنوبي وهما المجلدان القاريان الوحيدين الموجودان على سطح الأرض اليوم. توضح الخطوط الكنتورية عمق الجليد (بالأقدام).

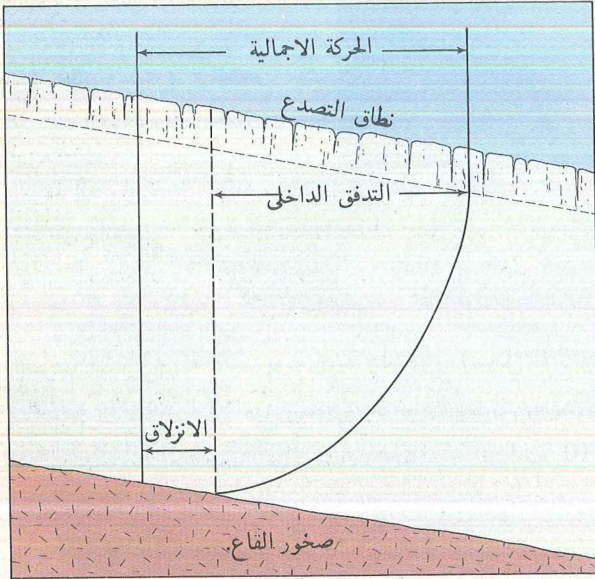
ساحلية شاسعة أهلة بالسكان (شكل 11 - 3). وإذا ما تمت إذابة جليد القطب الجنوبي تدريجياً فانها تكفي (1) لتغذية نهر المسيسيبي على مدى 50,000 سنة، (2) نهر الأمازون لمدة 5000 سنة، (3) أنهار العالم مجتمعة لمدة 750 سنة. ويوضح المثال السابق كمية الجليد الذي يغطي مساحات شاسعة من الكرة الأرضية. وما يذكر أن هذه الكمية تمثل فقط ثلث المجالد التي كانت موجودة في وقت من الأوقات. وسنتناول في نهاية هذا الفصل تلك الفترة التي يطلق عليها بالزمن الجليدي.

وتقدر الكمية الاجمالية للمياه المخزنة كجليد بما يزيد على 2 % من مياه العالم. وقد لا يكون هذا الرقم صحيحاً اذا ما أخذنا في الاعتبار الكمية الفعلية للمياه. ويقدر حجم المجالد الألبينية مجتمعة بحوالى 210,000 كيلومتر مكعب أى ما يضاف حجم مياه بحيرات العالم المالحة والحلوة. وبالإضافة الى ذلك فان مجلد القطب الجنوبي يمثل 80 % من جليد العالم، وما مقداره ثلثي مياه الكرة الأرضية العذبة. وإذا ما ذابت كل هذه الكمية فان مياه البحار سترتفع بين 60 و 70 متراً عن منسوبها الحالى مما سيؤدى الى غمر مناطق

التأثير المماثل بجوانبه فإن الحركة تكون بمعدل أسرع عند المنتصف.

ويرجع تاريخ أول محاولة لقياس حركة المجالد الى أكثر من مائة سنة. ففي تلك التجربة شقت مجموعة من العصي في خطوط مستقيمة بعرض مجلدة البنية. وبمشاهدة مواقع هذه العصي على فترات من الزمن تم التوصل الى نوع الحركة بالمجالد (شكل 11 - 6).

ما هي سرعة حركة المجالد؟ يعتمد معدل سرعة الحركة من مجلد الى آخر. فبعضها قد تكون حركته بطيئة جداً مما يسمح للأشجار والأعشاب أن تنمو على المخلفات الرسوبية المتراكمة على سطحه، بينما بعض المجالد يتحرك بمعدل سرعة تصل الى عدة أمتار في اليوم الواحد. وتتميز حركة بعض المجالد بفترة حركة سريعة تتبعها فترة تقارب وسكون هذا.



شكل 11 - 4

تنقسم حركة المجالدات الى قسمين. يكون الجليد تحت أعماق أكثر من 50 متر لدنا ومدفقا. وقد تنزلق كتلة الجليد الى الأمام دفعة واحدة ليحمل بنطاق التصدع فوق ما تحته. لاحظ أن معدل حركة الجليد يكون ابطأ عند قاع المجالد حيث تكون مقاومة الاحتكاك عالية.

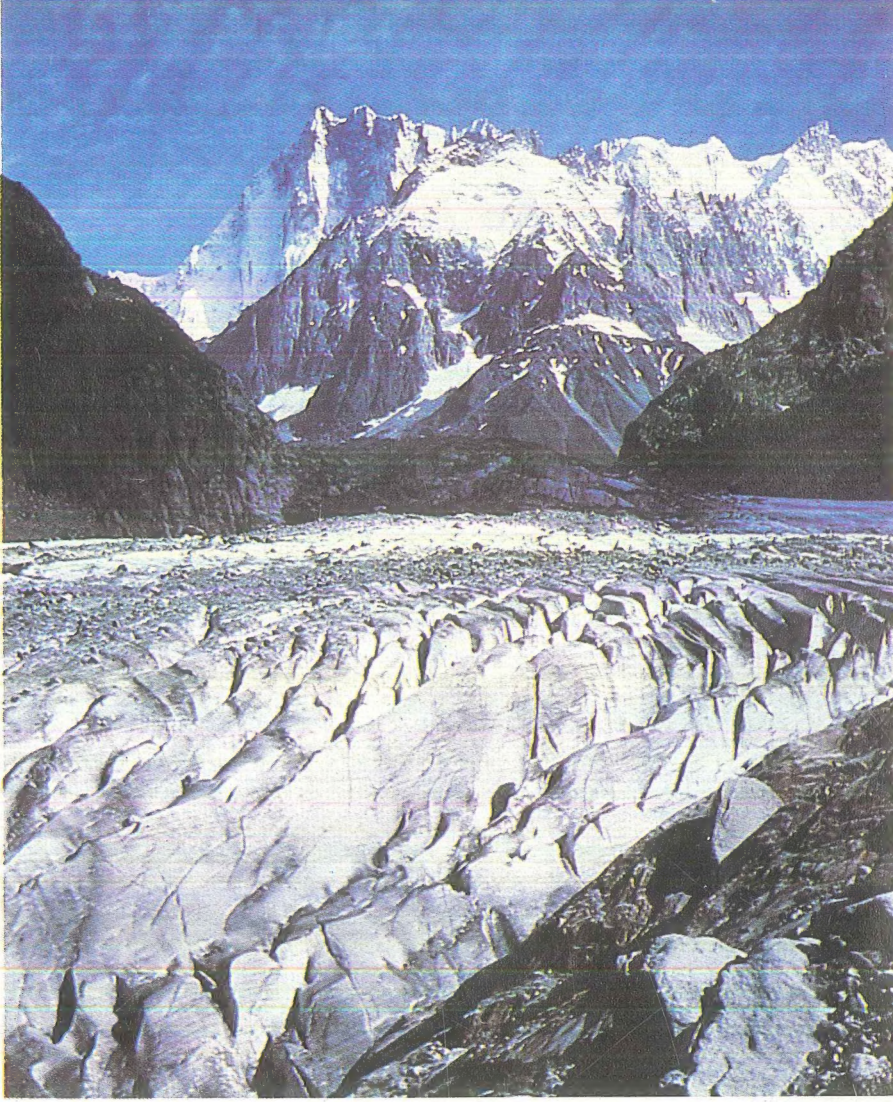
الحرارة أقل من 0°C . وقد تساعد عوامل أخرى على تواجد الماء داخل أعماق المجلد مثل إرتفاع درجة الحرارة بواسطة التدفق اللدائني (ظاهرة مماثلة لحرارة الاحتكاك) أو عن طريق الحرارة المنبعثة من باطن الأرض. وقد تستمد الحرارة من إعادة تجمد الماء المنساب، وهي ظاهرة تصاحب تغير حالة الماء من سائل الى صلب فيما يعرف بالحرارة الكامنة للاندماج.

ويوضح الشكل 11 - 4 تأثير هذين النوعين من الحركة الجليدية. ويبين هذا القطاع الطولي بأحد المجالد أن الجليد لا يتدفق بنفس المعدل، بل انه يشابه المياه التي تجري بالأنهار، حيث أن الاحتكاك بقاع المجرى الصخري يتسبب في ببطء حركة الأجزاء السفلية من الكتلة المائية.

وخلافا لما هو عليه عند أجزاء المجلد السفلية، فإن الخمسين مترا العليا تفتقر الى الضغط الكافي لجعلها في حالة دفع لدائني. وعليه فإن الجليد في هذا النطاق يكون سهل التشقق لذا يعرف بنطاق التصدع. وهذا النطاق يتحرك محمولا على ما تحته من الجليد. وعند حركة المجلد فوق منطقة وعرة يقع نطاق التصدع تحت قوة شد تسبب في تكوين تشققات تعرف بالتصدعات الجليدية (شكل 11 - 5). وقد يصل عمق هذه التصدعات الى خمسين مترا مما يجعل التنقل فوق المجالد تحفه الكثير من الأخطار. وعند هذا العمق يقف حد التصدعات عند نطاق الجليد المتدفق.

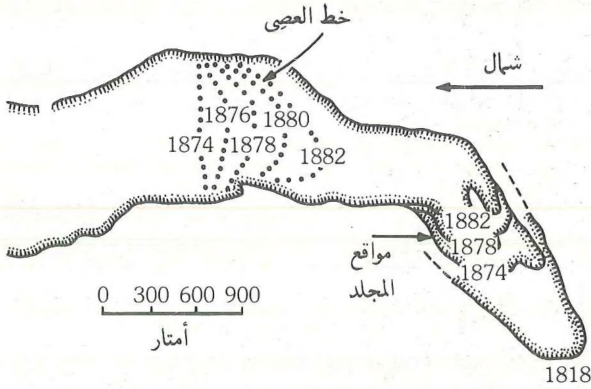
معدل حركة المجالد

خلافاً لما هو معروف على حركة مياه الأنهار فإن حركة المجالد لا تلاحظ بنظرة عابرة. وإذا ما تمكنا من مشاهدة مجلد متحرك بوادي جبلي فنستلاحظ أن حركته تشبه حركة مياه الأنهار حيث أن الجليد لا يتحرك بمعدل سرعة واحدة نتيجة مقاومة قاع المجرى وجدرانه بل إن الحركة تكون أسرع عند وسط المجرى. وحيث أن الاحتكاك بصخور القاع يعمل على ابطاء حركة الجزء الأسفل من المجلد بالاضافة الى



شكل 11 - 5

تتكون التصدعات في الجليد
الهش بنطاق التصدع. لا تستمر
هذه التصدعات الى نطاق
التدفق.



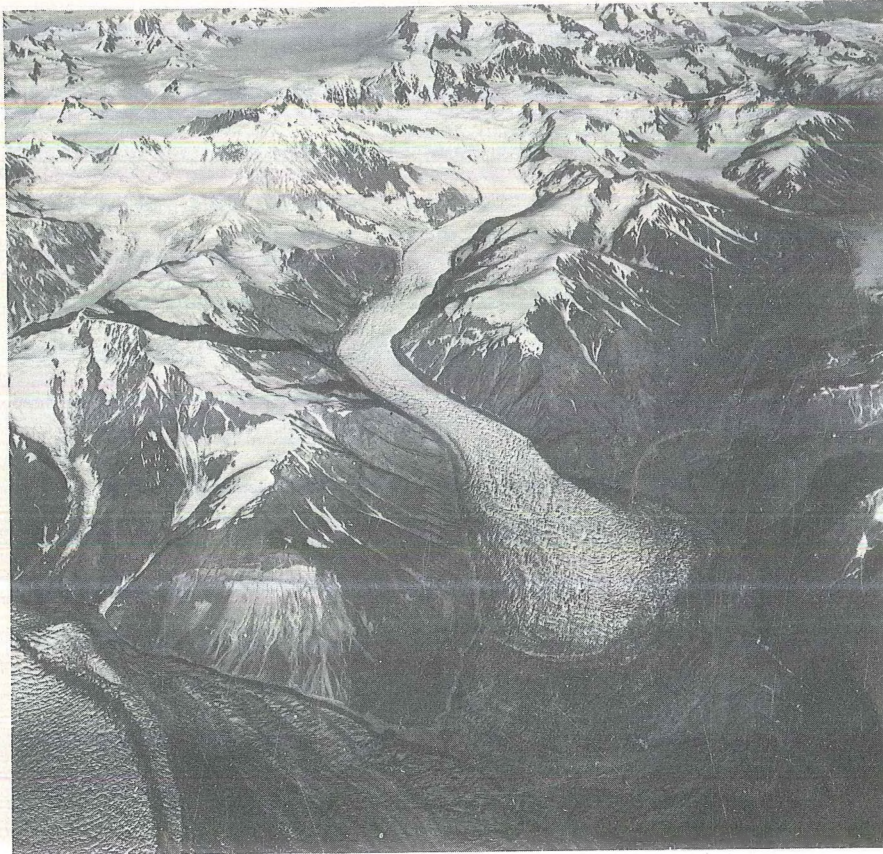
شكل 11 - 6

خريطة لمجلد الرزون بسويسرا. يتحرك الجليد ببطء على جانبي
المجلد. لاحظ انه بالرغم من تراجع المجلد الا ان الجليد
بداخل المجلد يتقدم الى الامام.

وتعرف فترة الحركة السريعة هذه بالتمور (شكل 11 -
7). وعلى سبيل المثال فقد تقدم مجلد حسان آباد بجبال
كراكورام باقليم كشمير شمالي غرب الهند ما يقارب 10
كيلومترات في أقل من ثلاثة أشهر أى بمعدل 130 مترا في
اليوم تقريبا. ولا يعرف سبب أو أسباب هذه الحركات
المفاجئة. فقد يكون أسفل المجلد ملتصق بالقاع الصخري
للمجرى، وعند ذوبان جزء منه وبالتالي تحرره إنطلق في
حركة سريعة ومفاجئة. ويعتقد البعض أن مقدمة المجلد
تعمل كسد تعيق حركته وبتزايد الضغط الناتج عن دفع
الجليد من ورائها يندفع المجلد في حركة مفاجئة.



أ



ب

شكل 11 - 7

تدفق مجلد فارجييتد الاليني
بالاسكا. صورتين جويتين تفصل
بينهما سنة (أ) - 29 هانيال
(أغسطس) 1964 و (ب) - 22
هانيال (أغسطس) 1965 .
يكون حجم المجلد بين 20 الى
50 ضعفا أثناء التدفق مقارنة
بمرحلة الهدوء.

الألبينية المتحركة في وديان تعمل على زيادة شكلها المزوى، باستحداث جدران وديان شديدة الانحدار والعمل على ثلم تلاها. وبالعكس من ذلك فإن المجالد القارية تعمل على تغطية المنطقة وبالتالي تشذيب الرؤوس البارزة التى تصادفها.

وفي الختام يجب التنويه الى أن مثل ما هو عليه الحال في سبل التعرية الأخرى فإن معدل التعرية الجليدية يتباين بشكل كبير حيث أن مدى تأثيره يرجع الى أربعة عوامل: (1) معدل حركة المجلد و (2) سمك الجليد و (3) شكل ووفرة وصلادة محتوى قاعدة المجلد من الفتات الصخرى و (4) مدى قابلية سطح المجلد للتعرية. وباختلاف هذه العوامل من وقت الى آخر ومن مكان الى آخر ينجم عنه التباين في معالم مناطق التجلد ومدى تأثيرها.

الأشكال الطبوغرافية الناجمة عن التعرية الجليدية

بالرغم من أن للمجالد القارية قدرة رهيبية على التعرية الا أن التضاريس الناتجة عن هذه الكتل الجليدية الضخمة لا تعطى ما يمكن أن تقدمه المجالد الألبينية من مناظر خلابة. وتتميز المناطق المتأثرة بصفائح الجليد القارية بسطح مستو ومصقول. وعلى العكس من ذلك فإن المجالد الألبينية تعمل على إبراز وتعميق الأخاديد الجبلية بمناطق تواجدها.

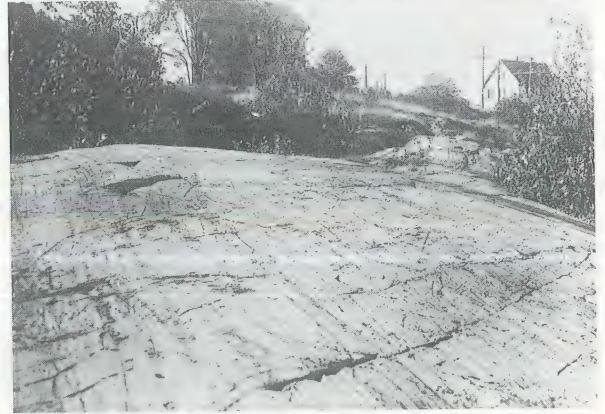
وديان المجالد

يكشف التجوال في الوديان الجليدية عن الكثير من الظواهر الناتجة عن الجليد. فالجليد لا يقوم بحفر مجراه بل يسلك مسارات المجارى المائية. وفي المرحلة السابقة للمجالد الألبينية تكون الوديان على شكل V حيث أن مجاريها فوق المستوى القاعى، وعليه تقوم بالقطع رأسيا. ولكن الوديان التى تمر بها المجالد لا تبقى على هذا الشكل، حيث أن الجليد يحور في شكلها بالتوسيع والتعميق الى غور جليدى على شكل حرف U اللاتينى (شكل 11 - 10).

العملية يتسرب الماء بالشقوق ومن بعد يتجمد مرة أخرى ويتمدد مسببا بتمدده في خلع أجزاء من الصخور يتراوح حجمها من حبات الدقيق الى حجم المنازل.

والطريقة الثانية لتعرية الجليد هي **الكشط** وأثناءها يقوم الجليد وممولته الصخرية المتحركة ببرد الطبقة الصخرية بقاع مجراه، وكذلك الصخور المنقولة بداخله. وقد يكون من المناسب تسمية نتاج ذلك بدقيق الصخر. وخير دليل على قدرة الجليد على انتاج الدقيق الصخرى لون الماء الضارب الى الرمادى اللون وللماء المغادر للمجالد عند ذوبان جزء منها. وعندما يحمل المجلد أجزاء صخرية كبيرة تحدث خدوش أو أخاديد بقاع مجراه تسمى بالحزات الجليدية (شكل 11 - 9). وهى تبين اتجاه حركة المجالد. وغالبا ما يمكننا التعرف على التصريف الجليدى بمنطقة واسعة عن طريق رسم خرائط لاتجاهات الحز الجليدى. وما يذكر أنه في حالة ما تكون أغلب حمولة المجلد من الغرين لا تتكون خطوط حز على سطح مجراه ولكنه يكون مصقولا.

ويختلف تأثير المجالد القارية عن المجالد الألبينية. فالزائر لمناطق المجالد الألبينية يشاهد طبوغرافية تتميز بأطراف مديبة ذات زوايا. والسبب في ذلك أن المجالد



شكل 11 - 9

كشط الجليد. خطوط كشط الجليد على صخور القاعدة بولاية ماسيتشوستس الأمريكية.

وقد ينتج عن حركة المجالد إقتلاع قطع صخرية من قاع المجرى لترك حفير تعرف عند امتلائها بالماء بالبحيرات الحُرزية، حيث أنها تشبه خرزات العقد عند النظر إليها من علٍ أو على خريطة.

وبالقرب من بداية الوديان الجليدية تتكون المدرجات الجليدية وهي كما يبين الشكل 11-12 انخفاضات لها جوانب شديدة الانحدار مفتوحة من أحد جوانبها على الودى. ويمثل المدرج البؤرة للمصدر الجليدى، أى منطقة تراكم الثلوج وتكون الجليد. وبالرغم من أن أصل المدرجات الجليدية غير كامل الوضوح، فيعتقد أنها جوانب جبلية وعرة

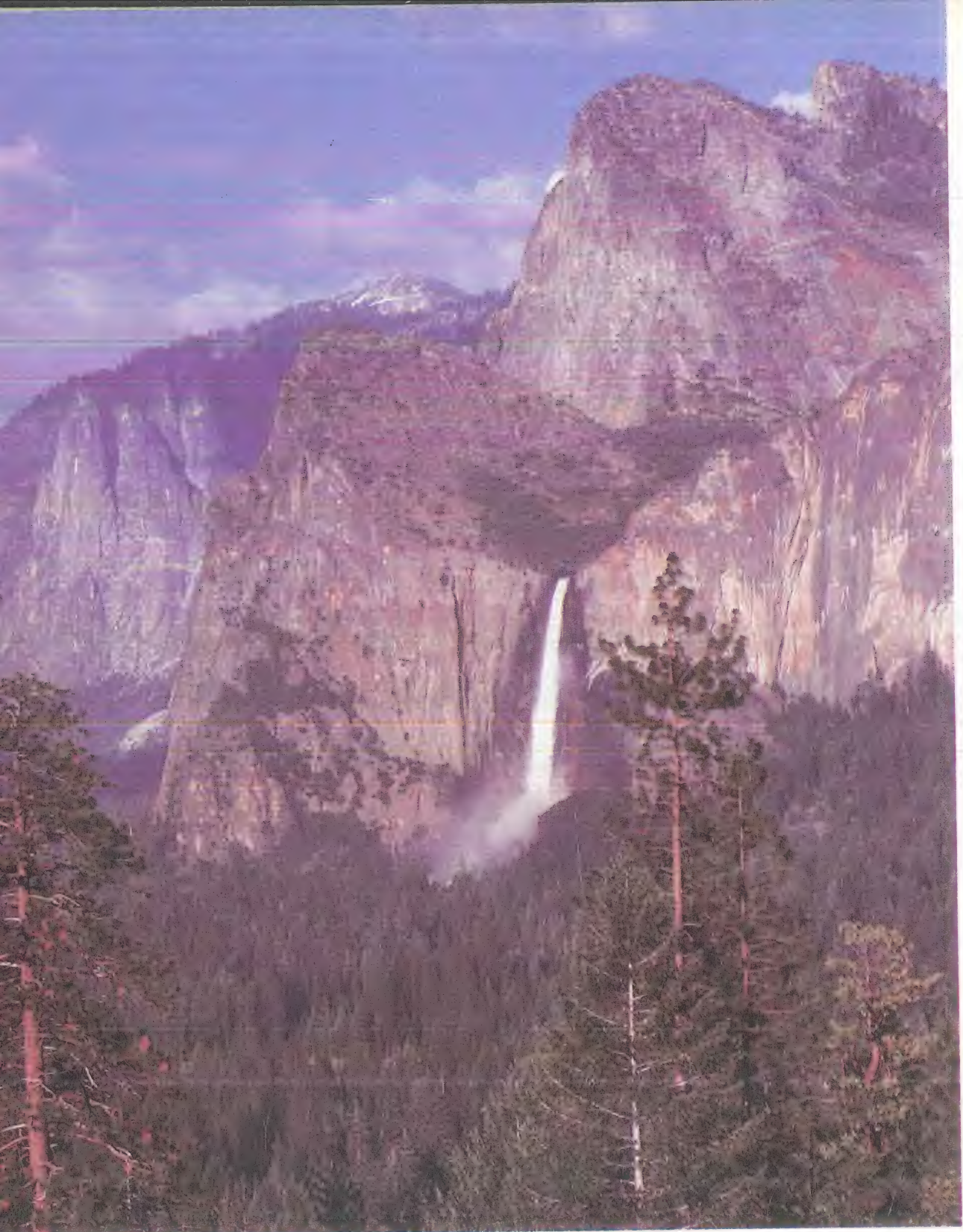
وبالإضافة الى التوسيع والتعميق يقوم الجليد بتقويم اتجاه الودى. فبتدفق الجليد بمحاذاة المنحنيات الحادة تعمل قوة اندفاعه على إزاحة النتوءات البارزة داخل المجرى مما ينتج عنه أجرف مثلثة الشكل تسمى النتوءات المبتورة.

وحيث أن قدرة التعرية للمجلد تعتمد على سمك الجليد به، فإن مجارى المجالد الرئيسية يتم تعميقها الى مستويات أقل من روافدها. وعليه بعد انحسار الجليد تبقى الروافد على مستوى أعلى من المجرى الرئيسى وتسمى الوديان المعلقة، وهذه عادة ما تكون مواقع شلالات فيما بعد كشلالات يوسيميتى بكاليفورنيا (شكل 11 - 11).



شكل 11 - 10

قبل التجلد يكون الودى الجبلى على شكل حرف V اللاتينى. أثناء التجلد يعمل الجليد على توسيع وتعريق واستقامة المجرى ليحوّله الى شكل حرف U .



شكل 11 - 11

شلالات بریدافیل بحديقة یوسمیتی تتساقط من وادٍ معلق الى منخفض جليدي.



شكل 11 - 12

منخفضات عند أعلى أودية جليدية تسمى المدرجات الجليدية.

الألب السويسرية ومضيق تيوجا بولاية نيفادا الأمريكية ومضيق بيرتاود بجبال الروكي.

وقبل انتهاء الحديث عن الوديان الجليدية يجب التنويه الى ما يعرف بالأزقة البحرية. وهي مداخل للبحر شديدة الانحدار توجد في مناطق كثيرة من العالم عند ملاصقة الجبال للمحيطات (شكل 11 - 14) مثال النرويج وكولومبيا وجرينلاند ونيوزلندا وشيلي والاسكا. وتمثل هذه الأزقة أغواراً جليدية شبه مغمورة بعد انحسار الجليد عنها وارتفاع

أو غير مستوية تم توسيعها بفعل الجليد المندفِع تحت المجلد وعلى جانبيه. وعند ذوبان المجلد عادة ما تكون هذه المدرجات مواقع بحيرات صغيرة تعرف بالبرك الجبلية (شكل 11 - 13).

وعند تواجد مجلدين على جانبيين متقابلين من قاسم جبلى يتم هدم الفاصل بين المدرجات الجليدية على الجانبين عن طريق اتساع كل منهما ليتكون ممر بين المجريين يعرف بمضيق الجليد الجبلى. ومثال ذلك مضيق جوتهارد بجبال



شكل 11 - 13

بركة جبلية بمدرج جليدى.

مجراه 250 مترا تحت مستوى سطح البحر وذلك قبل توقف قدرته على التعرية، وقبل أن يتحول الى كتل جليدية طافية على سطح البحر.

النتوءات والقرون الجبلية

لم تقتصر طبوغرافية المجالد الألبينية بجبال الألب والروكى الشمالية وغيرها على الأغوار والمدرجات الجليدية، بل تركت بالاضافة الى ذلك تلالاً متعرجة ومدينة تسمى

مستوى سطح البحر لغطية جزء منها. ويصل عمقها فى بعض الأحيان بين 1000 و 1500 متر، مع ملاحظة أن ارتفاع مستوى سطح البحر ليس بتلك الأهمية فى رفع قيمة عمق الأزقة البحرية الى هذا المقدار. ففى حالة الأنهار يعمل مستوى سطح البحر على الحد من قدرتها على تعميق مجراها. ولكن الحالة تختلف مع المجالد فهى قادرة على الاستمرار فى تعميق مجراها بعد ملاقة مستوى سطح البحر. فمثلا مجلد البينى سمكه 300 متر قادر على تعميق قاعدة



شكل 11 - 14

الأزقة البحرية منخفضة جليدية عرتها المياه. كانت هذه المنخفضات المغمورة اليوم مملوءة بالجليد أثناء البليستوسين. خليج آلاسكا الجليدي.

وقد تتكون النتوءات الجبلية بنفس هذه الطريقة، غير أن المدرجات الجبلية لا تكون عادة في وضع دائري حول قمة واحدة ولكنها تكون مصطفة على جانبي قاسم جبلي. وكلما كبرت المدرجات واتسعت أصبحت حافة الجبل حادة. وقد تتكون النتوءات بطريقة أخرى وهي تواجد مجلدين بوادين متوازيين، وذلك نتيجة ضيق المسافة بينهما بفعل

النتوءات الجبلية، وأخرى هرمية ومدبية تسمى القرون الجبلية. ويمكن أن تتكون النتوءات والقرون الجبلية عن طريق توسيع المدرجات الجبلية، مجموعة من هذه المدرجات حول قمة واحدة لأحد التلال يمكن أن تكون قرنا جبلياً، وأحسن مثال لذلك قرن الماتر بالجزء السويسري من جبال الألب (شكل 11 - 15).



شكل 11 - 15

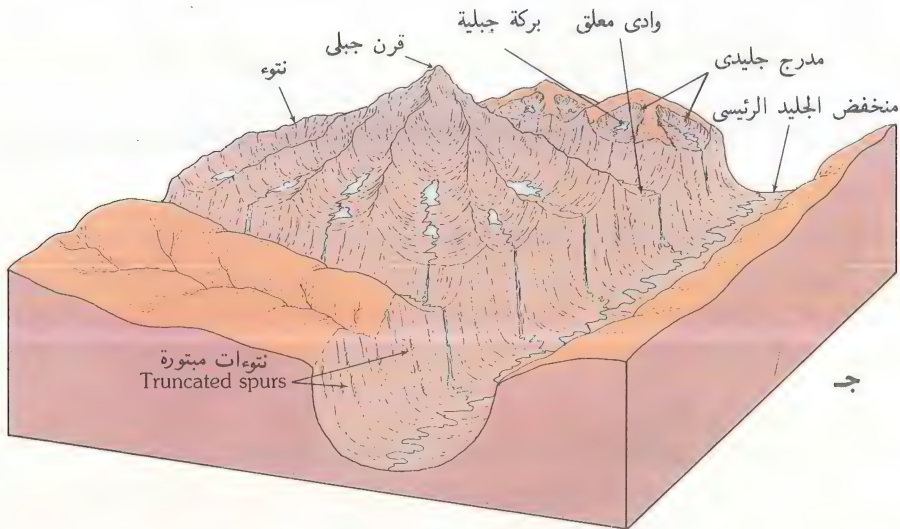
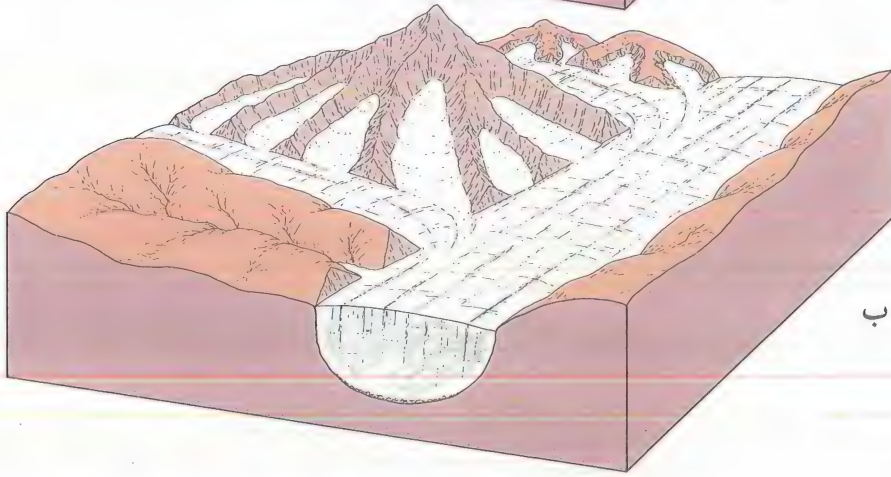
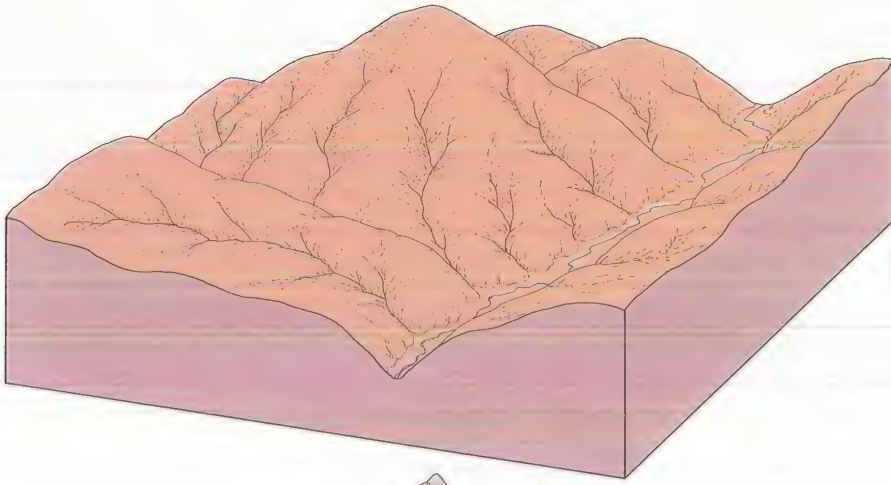
جبل الماترهورن. قمة شكلتها التعرية الجليدية بجبال الألب السويسرية.

كشط الهضاب الصخرية البارزة. وتسمى هذه الهضاب العديمة التآكل، صخور أصنام الأغنام ، « المقصود بهذا المصطلح مجموعة الصخور التي شكلتها المجالد، بحيث تبدو للناظر وكأنها أغنام مضطجعة » ويعمل هنا كشط الجليد على صقل الجانب الأقل انحدارا والمواجه لحركة الصفائح الجليدية ثم هدم نهاية الطرف العلوى مما يزيد من شدة ميل الجانب الآخر (شكل 11 - 16). وتستعمل هذه المرتفعات

اتساع مجرى كليهما. والشكل 11 - 16 يختصر الأشكال الطبوغرافية التي يمكن تكوّنها بالمجالد .

صخور أصنام الأغنام

في كثير من المناطق المتأثرة بالمجالد القارية يعمل الجليد على نحت بعض المرتفعات الانسيابية عن طريق



شكل 11 - 16

ظواهر تكونت بفعل مجلد ألبيني.
 (أ) - كتلة جبلية غير متأثرة
 بالجليد. (ب) - كتلة جبلية أثناء
 تجلدها. (ج) - الكتلة الجبلية
 بعد ذوبان الجليد مباشرة.



شكل 11 - 17

مرتفعات أصنام الأغنام بكندا. تم
كشط جهة المنحدر الطفيف وقضم
جهة المنحدر الشديد المائل. تحرك
الجليد من الشرق الى الغرب.

بأن هذه الرسوبيات انجرفت الى مكانها الحالي بفعل الجليد الطافي. وعليه ساد استعمال كلمة المنجرفة كتميز لهذا النوع عن باقى الرسوبيات. وبالرغم من الوصول الى التفسير الحقيقى لأصل هذه الرسوبيات الجليدية فان هذه التسمية بقيت مستعملة فى مصطلحات الدراسات الجليدية. وهى تستعمل اليوم للإشارة الى كل الرسوبيات الجليدية الأصل بغض النظر الى طريقة أو مكان أو شكل تجمعها.

ومما يميز الرسوبيات المنجرفة من تلك التى تراكمت بواسطة عوامل التعرية الأخرى هو أن التراكبات الجليدية تتكون أساسا من حطام صخرى ناتج عن التجوية الميكانيكية ولم يتأثر بالتجوية الكيميائية. وعليه فان هذه الرسوبيات تحوى الكثير من المعادن القابلة للتحلل الكيميائى مثال الهورنبلند والبلاجوكليس.

والرسوبيات الجليدية نوعان: (1) التى يتم ترسيبها مباشرة من المجال وتعرف بالثلل. (2) مواد تترسب من الماء الدائب من المجال وتسمى المنجرفات الطبقيّة .

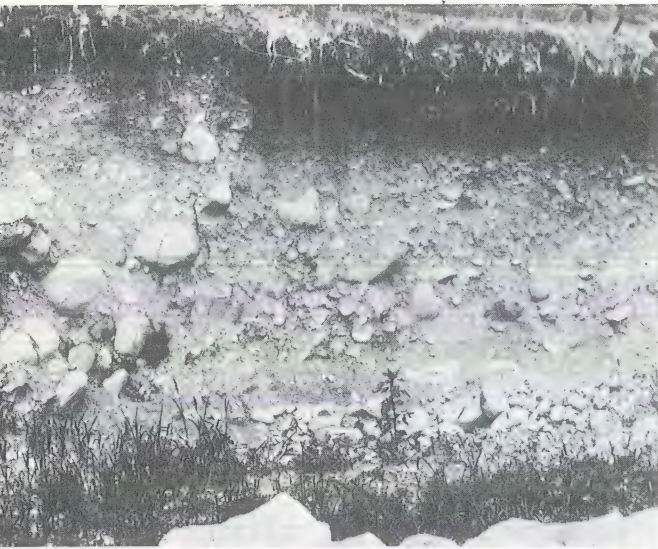
عند تواجدها لاستنتاج اتجاه الدفق الجليدى حيث يشير الجانب الأقل ميلا الى اتجاه تقدم الجليد.

الرسوبيات الجليدية

تستطيع المجال نحت ونقل كميات هائلة من الرسوبيات التى يتحتم عليها ترسيبها عند ذوبان الجليد ومن ثمّ تساهم هذه الرسوبيات فى رسم سمات تلك المناطق الطبوغرافية. وعموما فان النتائج النهائية لرسوبيات المجال هى الانقاص من تضاريس تلك المناطق العاملة بها وتسوية طبوغرافيتها. فكثير من المناطق الريفية مثال المراعى الجبلية بنيوانجلاند وحقول القمح بداكوتا والأراضى الزراعية بغرب وسط امريكا الشمالية هى نتاج مباشر للرسوبيات الجليدية.

وقبل اقتراح نظرية امتداد العصر الجليدى كان يعتقد أن أصل الكثير من مكونات التربة والحطام الصخرى، الذى يغطى مساحات شاسعة من أوروبا، كان قد نقل من مواقع أخرى غير المتواجدها. وفى وقت لاحق ساد الاعتقاد

معالم رسوبيات التل



شكل 11 - 18

رسوبيات التل الجليدية. خليط من الرسوبيات عديمة الفرز.

يتراكم التل بذوبان الجليد وترسب حمولته من حطام الصخور. وتميز رسوبيات التل من رسوبيات المياه الجارية والرياح بعدم فرز محتواها. أى أنها خليط من الأحجام المختلفة (شكل 11 - 18). وبتفحص هذه الرسوبيات بدقة يمكن ملاحظة صقل وتخرز محتوياتها مما يساعد على تمييزها عن باقى أنواع الصخور عديمة الفرز مثال فتات الدفق الطينى وصخور الانهيارات.

وعند احتواء التل على أحجام جلمودية أو تواجد الجلمود متناثرا على سطح الأرض تسمى الرسوبيات بالشاردة للدلالة على مصدرها الخارجى. وبدراسة الرسوبيات الشاردة بالاضافة الى الخصائص المعدنية لباقي محتويات التل، قد يستطيع الجيولوجيون التعرف على مسار المجلد المرسب لها. فمثلا وفي أجزاء من منطقة نيو انجلاند وغيرها من المناطق الأخرى تلاحظ الرسوبيات الشاردة متناثرة بالمراعى والحقول. وقد تستعمل أحيانا كحواجز لتحديد الأراضى (شكل 11 - 19). وتسبب الرسوبيات الشاردة متاعب فى إزالتها حيث أن فصل الشتاء من كل سنة يبرز على سطح الأرض كمية جديدة منها.

مورين النهاية والمورين الأرضى

يعتبر المورين أكثر التكوينات الجليدية انتشارا. وقد استعملت أصلا هذه التسمية عند الفلاحين الفرنسيين للإشارة الى الهضاب الواقعة عند حواف المجلدات بجبال الألب الفرنسية. غير أن هذه التسمية اليوم ذات معنى أعم يشمل كل المعالم المتكونة من التل .



شكل 11 - 19

رسوبيات الجليد الشاردة تم تنظيفها من المنطقة حيث استعملت علامات حدود لأحد الحقول.

ويتكون ما يعرف بمورين النهاية عند طرف كل من المجالد القارية والألبينية، وذلك عند تعادل الاستئصال وتراكم الجليد. أى أن مورين النهاية يتجمع عندما يصل معدل الذوبان والبحر الى معدل تقدم المجلد. وبالرغم من أن نهاية المجلد تتوقف عن التقدم فإن الجليد يستمر فى التدفق ممثلا مصدراً مستمراً للرسوبيات. وبذوبان الجليد يتراكم التل

مستوى رسوبيات الجزيرة، فقد غمرته مياه البحر بعد انتهاء الزمن الجليدي.

المورين الجانبي ومورين الوسط

ينتج عن المجلدات الألبينية نوعان من رسوبيات المورين التي تتواجد بالوديان الجبلية. ويعرف النوع الأول بالمورين الجانبي (شكل 11 - 20). وكما شرحنا أعلاه أن المجلد يقوم بتعرية جوانب مجراه بفاعلية خلال تحركه. وبالإضافة الى ذلك فإن كميات كبيرة من الفتات الصخري تضاف الى سطح المجلد بسقوطها من الأجزاء المرتفعة لجانبي المجرى، ومن ثم تنتقل الى حافة الجليد المتحرك. وعند ذوبان الجليد يتم ترسيب هذا الفتات الصخري أو المورين الجانبي بالقرب من جانبي المجرى في مرتفع من التل موازى للمجرى. والنوع الآخر من مورين المجالد الألبينية يسمى مورين الوسط (أنظر الصورة في مقدمة هذا الفصل). ويتكون مورين الوسط عند التحام إثنان من المجالد الألبينية. وبالتقاء التل المنقول على جانبي المجالدين يتكون شريط أسود اللون من الفتات الصخري داخل المجرى الجديد. ويدل هذا الشريط من الحطام الصخري داخل مسار المجلد على حركة المجالد حيث أنه يستحيل تكونه في غياب حركة تدفق المجلد. وكثيرا ما يلاحظ العديد من مورينات الوسط داخل مجلد ألبيني واحد، حيث أن شريطاً جديداً من مورين الوسط يتكون عند التحام أحد روافد المجلد بالمجرى الرئيسى.

التلال الجليدية البيضاء

ولا تقتصر مظاهر الرسوبيات الجليدية على المورين. فبعض المناطق التي سبق تغطيتها بصفائح الجليد القارية تتميز بتلال ملساء طويلة ومتوازية تسمى بالتلال الجليدية البيضاء (شكل 11 - 21). وأشهر مواقع التلال الجليدية تقع بالقرب من مدينة بوسطن الأمريكية فيما يعرف بتل البنكر. وبتفحص هذه التلال الجليدية يتضح أنها تلال انسيابية من رسوبيات التل عديمة التماثل، يتراوح ارتفاعها

وينمو مورين النهاية. وعليه كلما طالت مدة توقف المجلد عن الحركة كلما زاد حجم مرتفعات المورين.

وعندما يزيد معدل الاستئصال عن كمية الجليد المضافة تبدأ مقدمة المجلد في التراجع غير أن عملية نقل التل تستمر في تجميع كميات جديدة منه عند المقدمة. وبذوبان الجليد يتسبب التل في سهول متعرجة تعرف بالمورين الأرضي. ويعمل المورين الأرضي على تسوية معالم المنطقة بملء الحفر والجداول مما يؤدي في أغلب الأحيان الى تغيير قنوات الصرف. وعند حدادة تراكم التل يسوء تصريف المياه وتنتشر المستنقعات كما هو الحال عليه في منطقة البحيرات الكبرى.

ومن وقت الى آخر يتراجع المجلد الى حيث يتعادل الاستئصال والاضافة مرة أخرى وبهذا تستقر مقدمته حيث يتكون مورين النهاية مرة أخرى.

ويتبادل ترسب مورين النهاية والمورين الأرضي عدة مرات قبل اختفاء المجلد. وهنا يمثل مورين النهاية الخارجى أقصى حدود انتشار المجلد ويسمى كذلك هذا المورين بالمورين الطرفي. وتسمى مورينات النهاية المتكونة عند استقرار مقدمة الجليد المتراجعة بمورين الانحسار. ويلاحظ هنا أن كلاً من المورين الطرفي ومورين الانحسار متشابهان حيث يختلفان فقط في موقعهما.

ومن أمثلة رسوبيات مورين آخر الأزمنة الجليدية ما يوجد بمناطق الوسط الغربى والشمال الشرقى لأمريكا. ففي ولاية وسكنسون مثال نموذجى لرسوبيات المورين المعطاة لمنطقة هضاب وغابات واسعة، كما أن الرسوبيات الجليدية لجزيرة اللونج شمال شرقى مدينة نيويورك هى جزء من مورين النهاية يمتد من شرقى ولاية بنسلفانيا الى رأس كود بولاية ماساتشوستس. وقد ترسب مورين الطرف بهذه الجزيرة بواسطة مجلد قارى في مياه ضحلة نسبياً مقابل الشاطئ ومرتفع بضعة أمتار فوق مستوى سطح البحر. وحيث أن الجزء الواقع بين الجزيرة واليابسة لم يبلغ ارتفاعه



شكل 11 - 20

مورين الجوانب تم ترسيبه بواسطه
مجلد أتاباسكا المنحصر بجبال
الروكي الكندية.

شكل 11 - 21

تلال جليدية بولاية نيويورك. ظاهرة رسوية تصحب المجالد القارية.



يتم تراكمها مباشرة من الجليد كما هو الحال عليه في رسوبيات التل بل تمّ فرزها أثناء ذوبان الجليد. وتتكون هذه الرسوبيات في معظمها من الرمل والحصى الصغيرة، أى مكونات الحمولة الأرضية، حيث ان دقيق الصخر الأقل حجماً يبقى حيث يتم نقله بالماء الناتج عن ذوبان الجليد. ونظراً لمكوناتها من الرمل والحصى الصغيرة تعمل كتل الرسوبيات الطبقية كمصدر لمواد رصف الطرق ومشاريع البناء الأخرى.

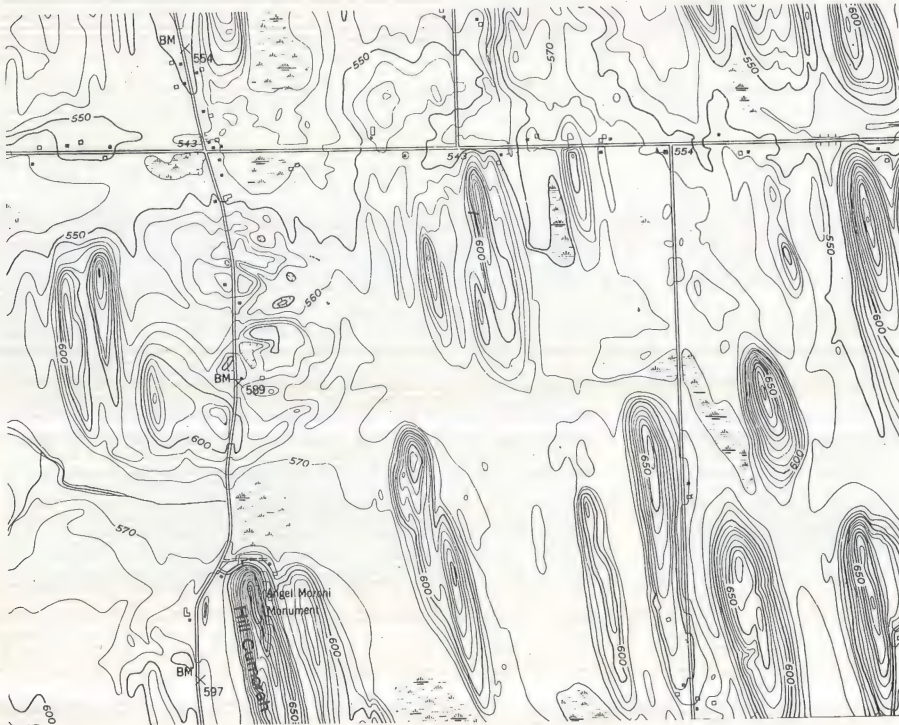
سهول رسوبيات الجليد المنقول وسلاسل رسوبيات الوديان الجليدية

وفي الوقت الذى يتكون فيه مورين النهاية يعمل الماء الناتج عن ذوبان الجليد على نقل بعض محتويات التل إلى الأمام. وعادة ما يندفع الماء الناتج عن ذوبان الجليد في جداول غالبا ما تضيق بحمولة مياهها، المعلقة بالاضافة الى حملها كمية من الحمولة الأرضية. وبمغادرة الماء للمجلد

بين 15 و 50 مترا وقد يصل طولها الى الكيلومتر. ويواجه الجانب الأكثر انحدارا جهة قدم الجليد بينما يشير الجانب الأطول والأقل انحدارا الى اتجاه حركة الجليد. ولا توجد التلال الجليدية البيضاء منفردة بل في مجموعات تسمى حقول التلال الجليدية البيضاء (شكل 11 - 22). وعلى سبيل المثال أحد هذه الحقول شرقى روشستر بولاية نيويورك يحوى ما يقارب 10,000 تل جليدى. ولا يعرف أصل تكون هذه التلال غير أن شكلها الانسيابي يدل على أنها تكونت في قوالب نطاق التدفق داخل مجلد نشط ويعتقد أن الكثير من هذه التلال قد تكون بتقدم الجليد فوق رسوبيات سابقة ومن ثم أعيد تشكيلها.

معالم كتل الرسوبيات الطبقية الجليدية

كما تدل تسميتها فان كتل الرسوبيات الطبقية تم فرزها حسب وزن وحجم محتوياتها من الحطام الصخرى. وحيث أن الجليد غير قادر على الفرز فإن هذه الرسوبيات لم



شكل 11 - 22

جزء من حقل تلال الجليد
البيضاوية، بباليرا. خريطة مبينة
على 7.5 دقائق. تدل شدة
الانحدار من ناحية الشمال على
جهة تقدم الجليد.

عن التدفق. وعندها يركد الجليد. وبمرور الوقت يعمل الماء الناتج عن ذوبان الثلج والمنساب من فوقه وتحتته وبداخله الى تجميع كتل الرسوبيات الطبقية. وذوبان الجليد الكامل تبقى هذه الرسوبيات على شكل مساطب ومرتفعات تعرف في مجموعها برسوبيات خط التلامس بالجليد وتصنف حسب أشكالها.

فبعض هذه الرسوبيات يأخذ شكل تلال شديدة الانحدار تسمى الكيم (شكل 11 - 24). وتتكون بعض الكيم بتجميع مكوناتها في حفرة داخل أو فوق الجليد الراكد. ويتكون البعض الآخر على شكل دلتا أو مراوح ناتجة عن تسرب الماء خارج الجليد. وذوبان الجليد تنهار هذه الكتل لتكوّن أكواماً مبعثرة وغير منتظمة من الرسوبيات الجليدية.

وعند تواجد الجليد بالوديان تتكون مساطب على جانبي الوادي تسمى مساطب الكيم. وعادة ما تتراكم مكونات هذه المساطب في شريط رسوبي طبقي ضيق بين الجليد وجانب الوادي، وذلك بواسطة مجارى المياه الملقية بحطام الصخر على طول حافة الكتلة الجليدية المنحسرة. كما توجد في المناطق الجليدية تلال متعرجة من الرمل والحصى قد يصل ارتفاعها الى 100 متر ويزيد طولها على 100 كيلومتر غير أنه يبلغ حجم الكثير منها أقل من ذلك بكثير. ويعتقد أن

يتحرك في منطقة مفتوحة مما يعمل على تناقص سرعته فجأة وبالتالي ترسيبه لحمولته الأرضية ثم انسياب الماء في شبكة قنوات للصرف على شكل جداول (شكل 9 - 15). وبهذا تتراكم كتل الرسوبيات الطبقية بمحاذاة معظم حواف مورين النهاية السفلى. وتسمى هذه الظاهرة بسهل رسوبيات الجليد المنقول وذلك عند ارتباطها بصفيحة جليدية. أما عند اقتصرها على واد جبلي تعرف بسلسلة رسوبيات الوديان الجليدية.

وكثيراً ما تميز سهول رسوبيات الجليد المنقول حفرة أو منخفضات تسمى الأخاديد الدائرية (شكل 11 - 23). وتتكون هذه الفجوات التي توجد أيضاً في رسوبيات التل عند ذوبان قطع كبيرة من الجليد الراكد المغروزة جزئياً أو كلياً داخل الرسوبيات الجليدية. وبالرغم من أن معظم الأخاديد الدائرية لا يزيد قطرها على إثنين من الكيلومترات فإن بعضها وجد بولاية منيسوتا الأمريكية بقطر يزيد على 10 كيلومترات. كما أن عمقها النموذجي لا يزيد على 10 أمتار فإن بعضها يصل 50 متراً. وفي كثير من الأحيان تتحول هذه الحفرة الى برك أو بحيرات بعد ملئها بالماء.

رسوبيات خط التلامس مع الجليد

ويصل المجلد عند إضمحلاله الى نقطة يتوقف فيها



شكل 11 - 24

الكيم الأبيض بغابة كيتل مورين وسكنسون.



شكل 11 - 23

مستنقع مائي بأخدود دائري بنهاية مجلد بيرو بجنوب شرقي آلاسكا.



شكل 11 - 25

يكشف إنحسار المجالد عن الكتيب وهو مرتفع منحني من الرمل والحصى الصغيرة تظهر هنا في وسط الصورة.

الجليد تعمل على حمل أحجام مختلفة من الرسوبيات غير أن هذه المياه المضطربة لا تسمح بترسب الأحجام الصغيرة منها.

الظواهر التي تعرف بالكتيب قد ترسبت كمرتفعات من جداول تجرى في قنوات فوق أو تحت أو من داخل الجليد (شكل 11 - 25). ويلاحظ أن المياه الناتجة عن ذوبان

نظرية التجلد والزمن الجليدي

طبقات من الرسوبيات الجليدية، والتي بكل منها نطاق متكامل من التعرية الكيميائية ومراحل تكون التربة وبقايا نباتات تحتاج الى مناخ دافئ لنموها. وعليه قد أصبح جلياً أن عدة أزمنة جليدية قد توالى على هذه المناطق فصلت بينها فترات طويلة كان فيها المناخ دافئاً. وعليه فإن الزمن الجليدي لم يتقدم الجليد خلاله ثم إنحسر فقط بل إنه زمن

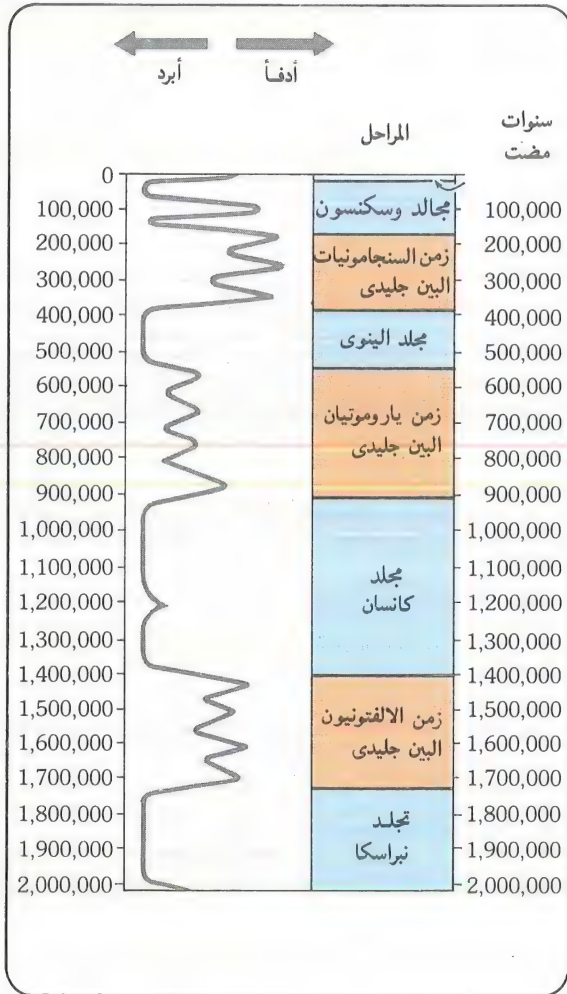
لقد سبقت الإشارة عدة مرات الى الزمن الجليدي. وهو الوقت الذي كانت فيه الصفائح الجليدية والمجالد الألبينية أكثر انتشاراً من الوقت الحاضر. وكما سبق أن ذكرنا أن التفسير الأكثر تداولاً لما يعرف الآن بالرسوبيات الجليدية أنها قد نقلت بواسطة الجبال الجليدية العائمة أو بواسطة فيضان جائح. إذاً ما الذي أقنع الجيولوجيين بوجود زمن جليدي تجمعت خلاله هذه الرسوبيات والظواهر الأخرى؟

في سنة 1821 م قدم مهندس سويسرى يدعى أجناز فينيتير بحثاً اقترح فيه ان ظواهر جليدية قد حدثت على مسافات بعيدة من حواف المجالد بجمال الألب. أى أن المجالد قد احتلت مواقع أسفل موقعها الحالى بكثير. وفي سنة 1836 م عقد العزم لويس أجاسيز، وهو عالم سويسرى أيضاً، على إثبات بطلان نظرية فينيتير ومن بعده جين ديشاربنتيير حول نشاط المجالد. غير أن دراسة أجاسيز الميدانية أفضته بصحة اعتقاد زملائه ومن ثم وضع بعد سنة أسس نظرية الأزمنة الجليدية التى اشتهر بها.

والدليل الذى استعمله أجاسيز والآخرون من بعده لاثبات النظرية الجليدية هو مثال نموذجى لتطبيق المبدأ الجيولوجى الذى يعرف بالانتظام. ولاستنتاجهم بأن بعض الظواهر لا يمكن أن تكون إلا نتاج المجالد فقد بدأوا فى إيجاد أبعاد امتداد الصفائح الجليدية عن طريق الرسوبيات المتواجدة بعيداً عن حواف المجالد فى الوقت الحاضر. وبهذا استمر تراكم الأدلة المساندة لنظرية المجالد خلال القرن الثامن عشر.

وبتكاتف جهود العلماء تمّ التعرف على مدى انتشار الصفائح الجليدية.

ومع القرن التاسع عشر عرف الجيولوجيون بدقة أكثر مدى المجالد خلال الزمن الجليدي. بالاضافة الى ذلك اكتشفوا خلال دراستهم أن عدة مناطق قد حوت عدة



شكل 11 - 26

تميز البليستوسين بالتذبذب فى وضعه المناخى. تم التعرف على أربعة مراحل جليدية منفصلة. [من د. ب. إركسون وج. وولين «تسلسل الأحداث المناخية عبر البليستوسين فى صخور البحر العميقة» (مجلة العلوم) « عدد 162 (1968 : 1233)].



شكل 11 - 27

عند أقصى حد لانتشار مجالد
البليستوسين غطت 10 مليون
كيلومتر مربع من قارة أمريكا
الشمالية.

ثلاثة ملايين سنة مضت أى أن معظم المراحل الجليدية قد حدثت أثناء عصر البليستوسين. وبالرغم من انتشار استعمال تسمية البليستوسين للدلالة على الزمن الجليدى فإن هذا العصر لم يشمل كل الفترات الجليدية. فعلى سبيل المثال يعتقد بأن صفائح جليد القارة القطبية الجنوبية قد تكونت 10 ملايين سنة مضت.

بعض المؤثرات غير المباشرة لمجالد الزمن الجليدى

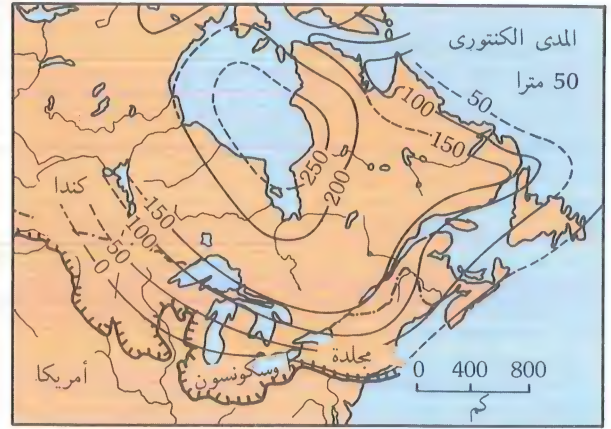
بالإضافة الى التعرية والترسيب فقد كان للصفائح الجليدية بعض التأثيرات الأخرى خلال فترات البليستوسين الجليدية. فمثلا كانت الحيوانات والنباتات مرغمة على الهجرة أمام تقدم الجليد. وحيث أن بعض هذه الكائنات لم يستطع تحمل مثل هذه التغيرات فقد انقرض مثال حيوان الكسلان الأرضى الضخم والنمر المسيف الأسنان وفيلة ما قبل التاريخ المسماة بالمستودون والماموث. بالإضافة الى ذلك فإن الكثير من مسارات الأنهار اليوم لا تشبه مساراتها قبل الزمن الجليدى. فمثلا نهر ميسورى كان يجرى الى الشمال تجاه خليج هدسون بينما كان لنهر الميسيسبى مسار خلال أواسط

تخللته عدة مراحل وأحداث تميزت بتقدم الجليد وإنحساره عدة مرات. ففي أمريكا الشمالية تم التعرف على أربعة فترات جليدية (شكل 11-26). وقد سميت كل من هذه الفترات باسم الولاية التى تحوى أكمل تكشف، أو درست بها رسوبيات أحد الفترات لأول مرة، وهى حسب توالى حدوثها: نبراسكا وكانساس والنيويز ووسكونسون. وتشير الأدلة المستمرة من أوروبا وآلاسكا بأن المد الجليدى قد يكون سابقا للتقدم النبراسكى. فخلال الزمن الجليدى تركت المجالد آثارها على حوالى 30 في المائة من مساحة اليابسة بالكرة الأرضية، شملت 10 ملايين من الكيلومترات المربعة بأمريكا الشمالية و 5 ملايين من الكيلومترات المربعة بأوروبا و 4 ملايين من الكيلومترات المربعة بآسيا (شكل 11-27). وتقدر كمية الجليد بنصف الكرة الشمالى فى ذلك الوقت بضعفى مقدارها بنصف الكرة الجنوبي، حيث أن الجليد بالقطب الجنوبي لم يستطع الانتشار خارج قارة القطب الجنوبي. وعلى العكس من ذلك فقد عملت أمريكا الشمالية وأوروبا وآسيا كامتداد طبيعى لليابسة إنتشرت فوقه الصفائح الجليدية.

ونعلم اليوم بأن الزمن الجليدى قد بدأ حوالى مليونين أو

المتزامن مع تقدم وانحسار الجليد. فقد أُشير في مقدمة هذا الفصل الى أن مستوى سطح البحر سيرتفع من 60 الى 70 مترا اذا ما اذيب جليد القارة الجنوبية (أنظر الشكل 11 - 29). ومثل هذا الحادث سيغمر الكثير من المدن الساحلية المكتظة بالسكان. وبالرغم من أن الحجم الكلي للجليد اليوم يزيد على 25 مليون كيلومتر مكعب فإن حجمه أثناء الزمن الجليدى قد كان حوالى 70 مليون كيلومتر مكعب أى بزيادة قدرها 45 مليون كيلومتر مكعب عن الوقت الحاضر. وحيث أن الجليد يتكون من بحر المحيطات فإن الزيادة في حجمه تعنى انخفاضاً في مستوى سطح البحر. وقد اقترح أن مستوى سطح البحر كان أقل بحوالى 130 مترا عن مستواه اليوم. وعليه فان بعض الأراضي التي يغمرها المحيط اليوم كانت يابسة في وقت مضى. فمثلا كان يقع شاطئ الولايات المتحدة الشرقي مائة كيلومتر الى الشرق من مدينة نيويورك، وكانت كل من بريطانيا وفرنسا ملتصقتان خلال ما يعرف اليوم بالقناة الانجليزية، كما كانت آلاسكا وسيبيريا متصلتين خلال مضيق بيرنج وكان جنوب شرقي آسيا أيضا متصلا بالجزر الأندونيسية.

وكما كان تكون ونمو الصفائح الجليدية رد فعل لتغير المناخ فإن وجود المجالد نفسها قد تسبب في تغير المناخ في المناطق الواقعة خارج نطاقها. فقد كانت درجة الحرارة وبالتالي معدل البخر أقل في المناطق الجافة وشبه الجافة، بالإضافة الى تكوين العديد من البحيرات التي تعرف بالبحيرات المطرية. ومن أمثلة البحيرات المطرية الكبيرة بحيرة بونيفيل بغربي أمريكا والتي يزيد عمقها على 300 متر وتبلغ مساحتها الاجمالية حوالى 50,000 كيلومتر مربع. وقد كانت هذه البحيرة بحجم بحيرة متشيجان اليوم. وبانحسار الصفائح الجليدية أصبح المناخ أكثر جفافا وتناقص مستوى الماء بالبحيرة تدريجيا. وبالرغم من اختفاء بحيرة بونيفيل إلا أن بعضاً من بقاياها ما زال الى الوقت الحاضر. وربما كانت أكثر هذه البقايا شهرة وأكبرها البحيرة المالحة الكبرى بولاية يوتا.



شكل 11 - 28

تسبب وزن الجليد بشال كندا حيث بلغ ذروته الى هبوط مستوى السطح. وعند ذوبان الجليد ارتفع مستوى هذه المناطق ليترك شواطئ الأمس على ارتفاعات عالية اليوم نسبة الى مستوى سطح البحر.

ولاية البنوى وكانت منابع نهر أوهايو بأواسط أمريكا. ويلاحظ أن بعض الأنهار اليوم تجري بها كميات ضئيلة من الماء بالرغم من شغلها لمسارات عريضة مما يدل على أنها كانت قديما تجري بها كميات اكبر من مياه الجليد الذائب. هذا وقد وجد أن الساحات التي كانت بؤرة للتراكبات الجليدية مثال سكاندينافيا والدرع الكندي قد زاد ارتفاعها بالتدريج عبر آلاف السنين الماضية. وكما يوضح الشكل (11 - 28) فان منطقة خليج هدسون قد ارتفعت حوالى 300 متر. وهذا ايضا ناتج عن المجالد القارية. ولكن كيف يعمل جليد المجالد على حركة القشرة الأرضية؟ يعتقد في الوقت الحاضر أن وزن ثلاثة كيلومترات من الجليد قد تسببت في تقعر القشرة الأرضية. وبازاحة هذا السمك من الثقل الجليدى فقد عملت القشرة الأرضية على الارتداد الى أعلى تدريجيا منذ ذلك الوقت.

وبالتأكيد فان أكثر المؤثرات بالزمن الجليدى تشويقا وربما إثارة هى انخفاض وارتفاع مستوى سطح البحر

أسباب التجلد

كبيرة من الآراء لتفسير أسباب ظاهرة التجلد فسنتناول هنا فقط بعض الأفكار الرئيسية لمحاولة اعطاء فكرة عامة على ما هو سائد حالياً في هذا الشأن.

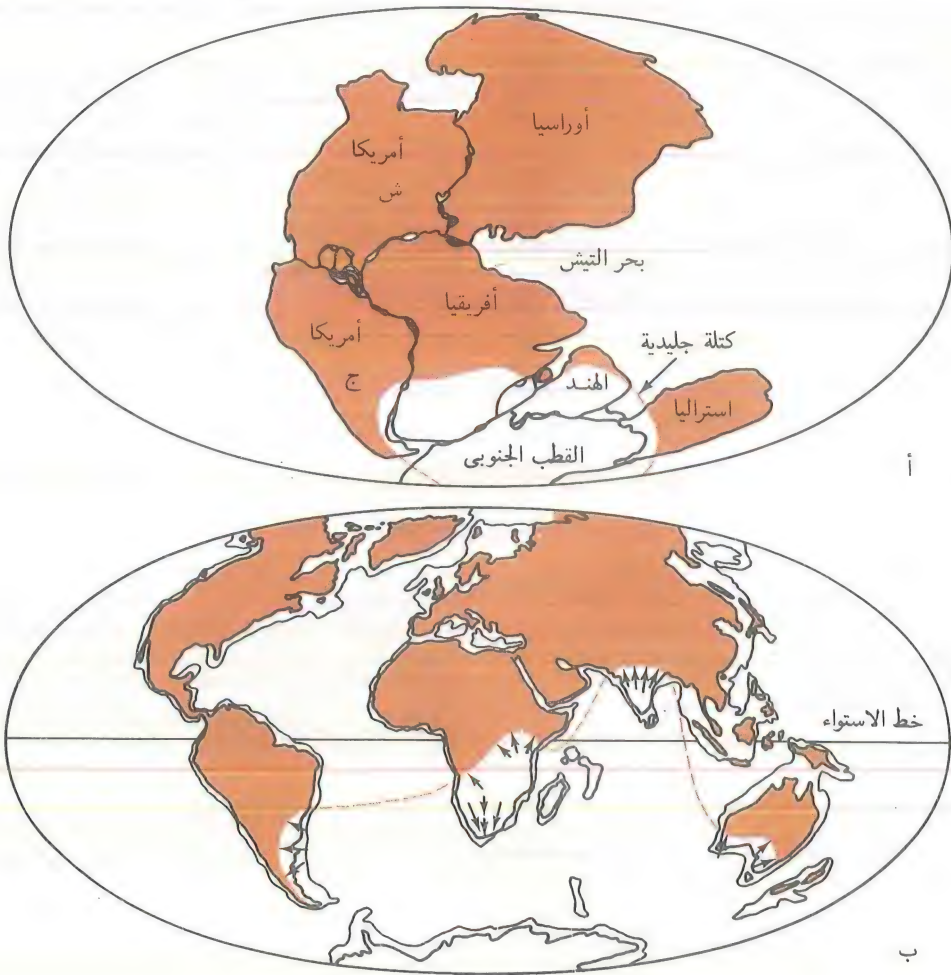
وربما كانت أكثر النظريات جاذبية لتفسير سبب انتشار المجالد ولرات قليلة خلال الماضى الجيولوجى، هى تفسيرات مبنية على نظرية حركية الألواح (مقدم شرح وافٍ عن حركية الألواح بالفصل الأول والسادس عشر). فالى جانب تفسير هذه النظرية للكثير من الوسائل والظواهر التى أسىء تفسيرها من قبل، قدمت تحليلاً مقبولا لبعض التغيرات المناخية غير المفهومة بما فى ذلك ظاهرة التجلد. وحيث أنه يقتصر تكوينها على القارات، فإنه يتحتم وجودها فى مناطق بعيدة عن خط الاستواء قبل بداية العصر الجليدى، اذ يعتقد كثير من المتخصصين بأن العصر الجليدى يبدأ بنقل القارات على الألواح القشرية الأرضية المتحركة الى مواقع قطبية.

والظواهر الجليدية تدل على أن ما يعرف اليوم بأفريقيا وأستراليا وأمريكا الجنوبية والهند قد مرت بعصر جليدى قرب نهاية دهر الحياة القديمة، أى حوالى 250 مليون سنة مضت. وقد حير ذلك الجيولوجيين لسنين طويلة. هل كان المناخ بهذه المناطق التى تعتبر نسبياً استوائية يشبه فى وقت من الأوقات مناخ جرينلاند وقارة القطب الجنوبى؟ لم يكن هناك جواب مقنع لهذا التساؤل الى أن عرفت نظرية حركية الألواح وقدمت الدلائل على صحتها. وفى وقتنا الحاضر علم الجيولوجيون أن هذه المناطق الحاوية للظواهر الجليدية كانت جميعاً فى قارة واحدة تعرف بالبنجيا. وكانت تقع بعيداً عن خط الاستواء الى الجنوب من مواقعها الحالية. وقد انقسمت هذه الكتلة الأرضية الكبيرة فيما بعد الى قطع تحركت على ألواح مختلفة منساقة تجاه مواقعها الحالية (شكل 11 - 29). ويعتقد الآن أنه خلال الماضى الجيولوجى قد سبب الانجراف القارى فى كثير من التغيرات الكبيرة فى الظروف المناخية أثناء حركة الكتل الأرضية بالنسبة لبعضها البعض وعلى أبعاد مختلفة من خط الاستواء. ومن المتوقع كذلك أن

عرف الكثير عن المجالد والتجلد. كما تمت معرفة تكوين المجالد وحركتها وأبعادها ماضياً وحاضراً الى جانب الظواهر التى تصاحبها سواء أكانت نتيجة للتعرية أو للترسيب. غير أنه لم يتم بعد وضع نظرية مقبولة تماماً حول أسباب ظاهرة التجلد. وبالرغم من مرور 150 سنة على اقتراح أجاسيز لنظريته حول الزمن الجليدى فإنه لم يتفق بعد على مسببات التجلد. وبينما كانت ظاهرة انتشار الجليد نادرة الحدوث فإن الزمن الجليدى الذى شمل عصر البليستوسين لم يكن الوحيد المعروف. فقد دلت على ذلك صخور التل التى اكتشفت فى طبقات العصور الجليدية. وتحوى هذه الصخور حطاماً صخرياً محزراً يعلوه سطح منحدر ومصقول الى جانب الاحجار الرملية أو المختلطة التى تبين مميزات رسوبيات الجليد المنقول. فقد تم التعرف على فترتين جليديتين خلال ما قبل الكمبرى أولاهما حوالى بليون سنة مضت والثانية حوالى 600 مليون سنة مضت. كما تم توثيق فترة جليدية أخرى بصخور نهاية دهر الحياة القديمة حوالى 250 مليون سنة مضت.

ولمحاولة تفسير أسباب ظاهرة العصور الجليدية لا بد من الاجابة على سؤالين أساسيين. الأول ما سبب بداية ظاهرة التجلد؟ فلتكوين الصفحات الجليدية لا بد وأن يكون متوسط درجة الحرارة أقل مما هى عليه فى الوقت الحاضر بل وأكثر برودة من معظم أوقات الزمن الجيولوجى. إذاً لا بد من تفسير مقنع لانخفاض درجة الحرارة تدريجياً الى أن تصل الى ظروف التجلد. السؤال الثانى: ما هو سبب التبدل من الأزمنة الجليدية الى الأزمنة البين جليدية الى الجليدية والمعروفة خلال عصر البليستوسين؟ فبينما يتناول السؤال الأول التغير فى درجة الحرارة على مدى زمنى طويل يقاس بملايين السنين فإن السؤال الثانى له علاقة بتبدل درجة الحرارة على مدى زمن أقصر بكثير.

وبالرغم من أن ما كتب علمياً تناول بغزارة مجموعة



شكل 11 - 29

(أ) - قارة بنجيا العظمى مبينا عليها حدود انتشار الجليد قبل 300 مليون سنة مضت. (ب) - القارات في وقتنا الحاضر. تبين المنطقة المظللة اماكن وجود الشواهد على حدوث التجلد. ويبين الخط المنقط حدود الكتلة الجليدية اذا ما كانت القارات ثابتة.

وحيث أن التغير في المناخ الناتج عن تحرك الألواح القارية شديد التدرج، فإن نظرية الانجراف القاري لا تفسر تعاقب المناخ الجليدي والبين جليدي الذي حدث أثناء عصر البليستوسين. كان لزاما علينا أن نبحث على ميكانيكية أخرى لاجداث تغير في المناخ على مدى آلاف السنين بدل ملايين السنين. ففي الوقت الحاضر يعتقد

تكون قد حصلت تغيرات في حركة الدورة المائية وما يتبعها من نقل للحرارة والرطوبة وتغير في المناخ. وحيث أن معدل حركة الألواح بطيء، اذ يقدر ببعض السنتيمترات سنويا فإن التغير الكبير في المواقع يحدث على مدى زمني طويل. وعليه فإن التغير في المناخ بسبب الانجراف القاري يكون بطيئا للغاية ويحتاج الى ملايين السنين.

الدراسات الحديثة. ومن الدراسات الحديثة التى ساهمت فى مساندة هذه النظرية والوقوف الى جانبها دراسة بعض الرسوبيات من أعماق بحرية كبيرة تحوى أحياء دقيقة ذات حساسية عالية للتغير المناخى، وذلك بغرض وضع دليل منظم للتغير فى درجة الحرارة طوال نصف مليون سنة. وقد قورن هذا المقياس الزمنى للتغير المناخى بالحسابات الفلكية لاختلاف المركز ومقدار الميل والتذبذب وذلك للتأكد من وجود أسس للمقارنة. وبالرغم من عمق الدراسة وتعقيد حساباتها، إلا أن النتيجة كانت واضحة، حيث وجد الباحثون أن التغير فى المناخ على مدى عدة مئات من آلاف السنين مضت لها علاقة مباشرة بشكل مدار الأرض. أى أن دورات التغير المناخى كانت متزامنة مع أوقات الاختلاف المركزى والميل والتذبذب فى محور الأرض. وقد بينوا بالتحديد أن التغير فى شكل مدار الأرض هو السبب الرئيسى لتوالى العصور الجليدية خلال الدور الرباعى.

ودعنا الآن نلخص النظريات التى تعرضنا إليها فى هذا الشأن. تقدم نظرية الانحراف القارى تعليلاً للفترات الجليدية المتباعدة وغير الدورية خلال أوقات مختلفة من الزمن الجيولوجى، بينما قدمت نظرية ميلانكوفتش الفلكية والمدعمة حديثاً بدراسة ج. د. هيز وزملائه تفسيراً للفترات الجليدية والبين جليدية خلال البليستوسين.

وباختصار يجب التنويه الى أن الأفكار التى تم شرحها هنا ليست الاحتمالات الوحيدة لتفسير العصور الجليدية. وبالرغم من أنها منطقيتان إلا أنها لا يخليان من النقد، وليستا الوحيدتين اللتين تحت الدراسة لتفهم أسباب تجلُّد العصور الجليدية. فمعطيات كثيرة قد تحُدُّ وبعضها قد يكون تحت قيد البحث فى هذا الشأن.

الكثير من العلماء أن التقبل الذى ميّز مناخ البليستوسين كان سببه تغير فى مدار الكرة الأرضية. وكان أول من تقدم بهذه الفرضية عالم يوغوسلافى يدعى مولتن ميلانكوفتش، والتى مفادها أن التغيرات فى كمية الاشعاعات الشمسية القادمة الى الكرة الأرضية هى العامل الرئيسى للتحكم فى المناخ. ووضع لذلك ميلانكوفتش نموذجاً رياضياً مفصلاً بناء على المعطيات التالية:

- 1 - الانحراف عن مدار الأرض حول الشمس (الاختلاف المركزى).
- 2 - التغير فى الميلان، أى الزاوية بين المحور وسطح مدار الأرض (مقدار الميل).
- 3 - تذبذب محور الأرض.

وباستعمال هذه العوامل حسب ميلانكوفتش مقدار التغير فى الطاقة الشمسية وعلاقتها بدرجة حرارة سطح الكرة الأرضية خلال الزمن الجيولوجى وذلك لمحاولة ربطها بالتبدل فى مناخ البليستوسين. ولتفسير التغير فى المناخ بسبب هذه المعطيات الثلاثة يلاحظ أن تأثيرهما إن وجد بسيط ولا يذكر فى كمية الطاقة الشمسية التى تصل الأرض. وعموماً يتم الشعور بهذه المتغيرات بالزيادة فى درجة التباين بين فصول السنة. فاعتدال درجة الحرارة فى المناطق البعيدة ومتوسطة البعد من خط الاستواء يعنى زيادة فى كمية الثلوج المتساقطة. بينما انخفاض درجة الحرارة صيفاً يحد من ذوبان الثلج.

وقد تم قبول نظرية ميلانكوفتش الفلكية على مدى واسع، ثم قبلت برفض تبعه قبولها مرة أخرى على ضوء

أسئلة للمراجعة :

- 1 - ما هو المجالد؟ تحت أى ظروف يتكون جليد المجالد؟
- 2 - أين توجد المجالد اليوم؟ ما هى النسبة التى تغطيها المجالد من سطح الأرض؟ كيف تكون هذه المساحة مقارنة بتلك التى غطتها خلال البليستوسين؟
- 3 - صف طريقة تدفق الجليد. هل يتحرك الجليد دفعة واحدة فى المجالد الألبينية؟ إشرح.
- 4 - لماذا تتكون التصدعات الجليدية فى الجزء العلوى من المجالد ولا تتكون تحت عمق 50 متراً؟
- 5 - تحت أى ظروف تتقدم مقدمة جليد المجالد؟ تراجع؟ تبقى فى مكانها؟
- 6 - صف طرق التعرية بالمجالد.
- 7 - كيف تختلف الوديان الجبلية الجليدية عن باقى الوديان الجليدية غير المتجلدة؟
- 8 - عدد وصف الأشكال المتوقع وجودها نتيجة للتعرية الجليدية - منطقة المجالد الألبينية.
- 9 - ما هو الانجراف الجليدى؟ ما هو الفرق بين التل ورسوبيات الجليد المنقولة؟ ما هو تأثير الرسوبيات الجليدية على طبوغرافية المنطقة بصورة عامة؟
- 10 - اذكر الأنواع الخمسة الأساسية للمورين وما هى الخصائص المشتركة بين أنواع المورين؟ على أى شىء يدل المورين الطرفى ومورين الانحسار؟
- 11 - كيف تتكون الأحاديد الدائرية؟
- 12 - فى أى اتجاه كانت تتحرك الألواح القارية المؤثرة فى المنطقة المبينة بالشكل 11-23؟ اشرح كيف تمكنت من تقرير ذلك.
- 13 - ما هى رسوبيات خط التلاشى؟ ميز بين الكيم والكثيب.
- 14 - تطور نظرية المجالد مثال جيد لتطبيق مبدأ الانتظام. اشرح ذلك باختصار.
- 15 - لقد تم التعرف بأمريكا الشمالية على أربعة فترات جليدية رئيسية. اذكرها بترتيب حدوثها.
- 16 - كان الجليد بنصف الكرة الشمالى أثناء عصر البليستوسين ضعيف ما كان عليه بنصف الكرة الجنوبى. اشرح ذلك باختصار.
- 17 - اذكر ثلاث مؤثرات غير مباشرة للزمن الجليدى.

الكلمات الدالة :

tillite	صخور التلّ	ablation	إستئصال
kettle	أخاديد دائرية	plucking	إقتلاع / إحتجار
firn	فيرن	basal slip	إنزلاق قاعدى
esker	كثيب	calving	إنشعاب
abrasion	كشط	pater noster lakes	بحيرات خرزية
kame	كيم	pluvial lake	بحيرة مطرية
glacier	مجلد	tarn	برك جبلية
alpine glacier	مجلد ألبينى	glacial striations	تحرز جليدى
continental glacier	مجلد قارى	surge	تمور
cirque	مدرج جبلى	crevasse	تصدع جليدى
roche moutonnee	صخور أصنام الأغنام	till	تلّ
kame terrace	مساطب الكيم	drumlin	تلال جليدية بيضاوية
col	مضيق جليد جبلى	Pleistocene Epoch	عصر البليستوسين
glacial trough	منخفض جليدى	snowline	خط الثلج
ground moraine	مورين أرضى	rock flour	دقيق صخرى
recessional moraine	مورين الانحسار	glacial erratic	رسوبيات جليدية شاردة
end moraine	مورين النهاية	ice contact deposit	رسوبيات خط التلامس
terminal moraine	مورين الطرف	stratified drift	رسوبيات طباقية منجرفة
medial moraine	مورين الوسط	drift	رسوبيات منجرفة
lateral moraine	مورين جانبى	fjord	زقاق بحرى
arete	نتوء جبلى	outwash plain	سهل رسوبيات
truncated spur	نتوءات مبتورة	valley train	الجليد المنقول
zone of accumulation	نطاق التجمع		سلاسل رسوبيات
zone of fracture	نطاق التصدع		الوديان الجليدية
hanging valley	وادى معلق		

12



الصحارى والرياح



الصحارى

- توزيع الأراضي الجافة

- ما المقصود «بالجافة»؟

العوامل الجيولوجية بالمناخ الجاف

نقل الرياح للرسوبيات

- الحمولة الأرضية

- الحمولة المعلقة

التعرية بواسطة الرياح

رسوبيات الرياح

- الرسوبيات الرملية

- أنواع الكثبان الرملية

- الراسب الغريني

تطور مظاهر التضاريس الصحراوية

الصحارى

تعنى كلمة صحراء المنطقة المهجورة أو القاحلة. وبالطبع فإن الكثير من الصحارى ليست مهجورة ولكنها مأوى للكثير من البشر. وباستثناء المناطق القطبية فإن معرفتنا بالصحارى أقل من أى بقعة على هذه الأرض. فمثلا لا تغطى الكثبان الرملية كل أرجاء الصحارى كما هو معروف عنها. فالكثبان الرملية توجد ببعض المناطق الصحراوية، وهى من معالمها المميزة ولكنها تمثل نسبة ضئيلة من المجموع الكلى لمساحة الصحراء. فالصحراء الكبرى، وهى أوسع الصحارى فى العالم رقعة، تغطى الكثبان الرملية 10 % فقط من مساحتها. أما الغطاء المتالى للصحارى فهو يتكون من طبقات صخرية مكشوفة أو رقعة فسيحة من الأحجار.

وادی سان لويس بجنوب كولورادو، البعض من الكثبان الرملية بشرقى هذا الوادى تعتبر من اعلى كثبان العالم الرملية.



شكل 12 - 1

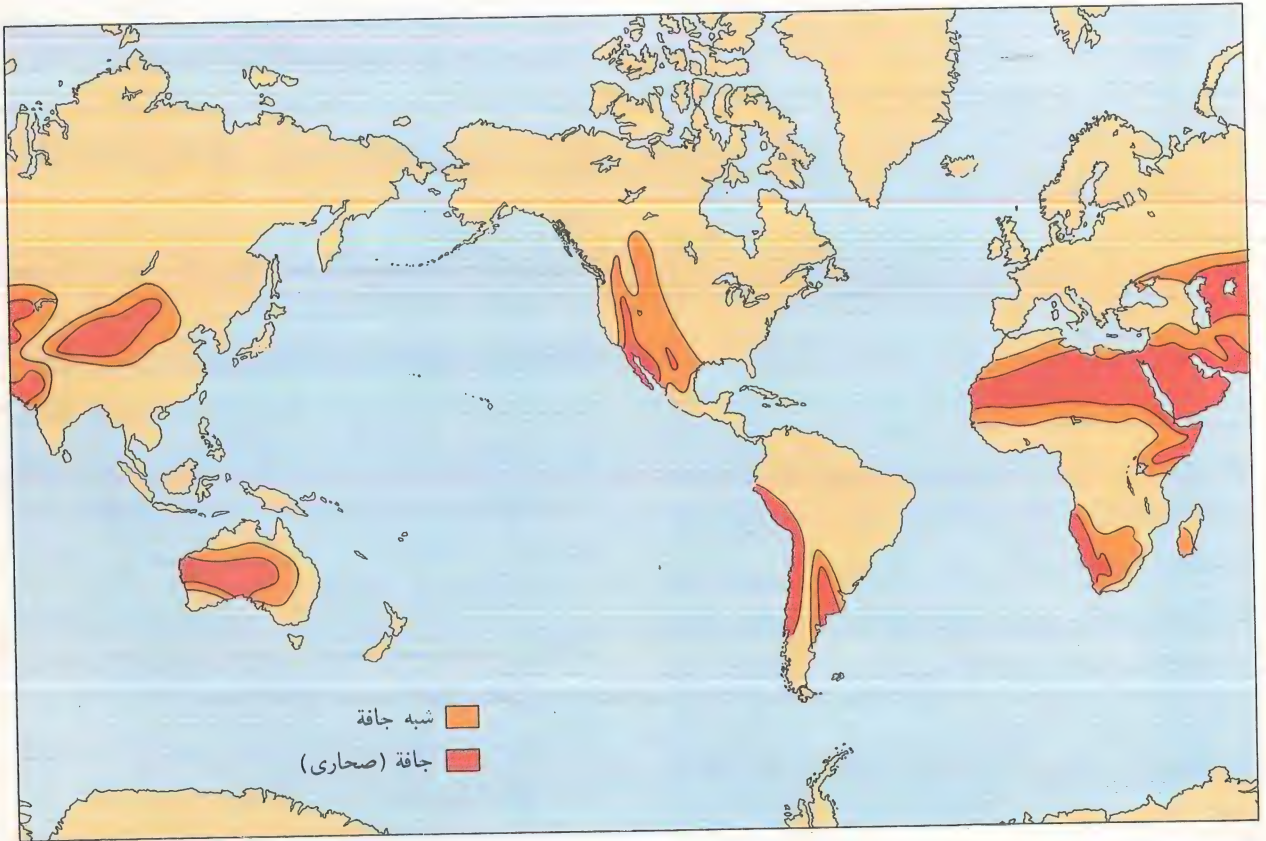
منظر بصحراء سوناران بولاية
أريزونا. كما تلاحظ توجد أنواع
متعددة من الحياة بمناطق المناخ
الجاف.

هذه المناطق. وغالبا ما تكون سيقانها مدعمة بنسيج اسفنجي له القدرة على تخزين كمية تكفي احتياج النبات بين مواسم الأمطار. وبالرغم من أنها بعيدة في توزيعها عن بعضها البعض وتقدم غطاءً نباتيا غير متكامل إلا أن البعض من أنواع هذه النباتات ينتشر وبكميات كبيرة في المناطق الصحراوية.

توزيع الأراضي الجافة

تبلغ مساحة الصحارى (المناطق الجافة) والسهب (الشبه جافة) بالعالم حوالى 48 مليون كيلومتر مربع أى ما يقارب ثلث مساحة سطح الكرة الأرضية. ولا يضاهاها في

وكون المناطق الجافة خالية من أى حياة هى مغالطة أخرى. فبالرغم من أنها محدودة العدد مختلفة النوع فإن الحياة النباتية عادة ما تكون موجودة (الشكل 12 - 1). وتختلف النباتات الصحراوية من مكان الى آخر، غير أنه لها ميزة واحدة وهى قدرتها على ملائمة ظروف الجفاف. وتسمى هذه النباتات بالجافوفية. وكثير منها ذات أوراق أو سيقان أو فروع شمعية للحد من المياه المفقودة. وبعض هذه النباتات عديم الأوراق أو أن أوراقه صغيرة بالاضافة الى أن جذور بعضها تمتد الى أعماق كبيرة للوصول الى الرطوبة. بينما للبعض الآخر شبكة جذرية كبيرة وقريبة من السطح لامتصاص اكبر كمية من مياه الأمطار النادرة الهطول في



شكل 12 - 2

يفضى المناخ الجاف والشبه الجاف حوالى 30% من سطح الأرض ولا يضاهاه في ذلك أية مجموعة مناخية أخرى.

مقادير هطول الأمطار، مثال 25 سنتيمترا في السنة. غير أن الجفاف كلمة نسبية تشير الى وضع تفتقد فيه كميات المياه اللازمة للاستهلاك. وقد عرّف علماء المناخ الجفاف بالحالة التي تنقص فيها كميات الأمطار عما تفقده الأرض عن طريق البحر، وعليه فإن الجفاف لا يقتصر على كمية الأمطار الهاطلة ولكنه أيضا يرتبط بكمية البحر التي بدورها تعتمد على درجة الحرارة. وبزيادة درجة الحرارة تزداد كميات البحر. فمثلا كمية من الأمطار تبلغ 25 سنتيمترا قد لا تكفى لأكثر من غطاء نباتي بسيط في المناطق الحارة نسبيا. غير أن مثل هذه الكمية في منطقة باردة قد تكفى لسد حاجات غابات بكاملها.

ومناخيا فإن أهم مميزات الصحارى، بالإضافة الى قلة مجموع كمية الأمطار السنوية بها، هو أن هذه الكمية غير منتظمة المطول بين سنة وأخرى. وعموما فانه كلما قلت كمية الأمطار الهاطلة سنويا كلما زاد عدم الانتظام في هطولها. وعليه فإنه لا يعتمد على معدل هطول الأمطار في المناطق الصحراوية، حيث عادة ما يكون عدد السنوات التي تقل فيها الأمطار عن المعدل أقل من التي تكون فيها أعلى منه.

العوامل الجيولوجية بالمناخ الجاف

تتميز المناطق الصحراوية بتلاها المدينة، ووديانها الضيقة المحفوفة بجوانب شديدة الانحدار، وغطائها المكون من الحصى أو الرمال، وذلك على عكس المناطق الرطبة ذات الجبال غير المدينة والمميزة بكثرة تعاريج جوانبها. وقد يتخيل زائر الصحراء القادم من المناطق الغزيرة الأمطار أن تضاريسها قد شكلت بفعل عوامل غير التي فيها. ولكن العكس هو الصحيح حيث أنها نتاج عمل نفس العوامل ولكن تحت ظروف مناخية مختلفة.

ففي المناطق الرطبة نجد أن السطح تغطيه تربة دقيقة البنية نسبيا لضمان غطاء نباتي شبه متكامل. وهنا تكون المنحدرات وحواف الصخور أكثر دائرية، مما يعكس الأهمية

ذلك أى تقسيم مناخى آخر. وبالنظر الى التوزيع الجغرافى للصحارى والسهب (شكل 12 - 2) نجد أنها تتركز في المناطق المتوسطة وشبه الاستوائية.

وتقع المناطق الجافة غير البعيدة من خط الاستواء بجوار مدارى الجدى والسرطان. وشكل 12 - 2 يوضح نطاقا صحراويا ممتدا عبر الشمال الأفريقى الى شمال غربى الهند. وبالإضافة الى هذه المساحة الصحراوية هناك صحارى في مناطق شبه استوائية أخرى تشمل شمال المكسيك وجنوب أمريكا والساحل الغربى لأمريكا الجنوبية وجزءاً كبيراً من استراليا. ويرجع وجود المناطق شبه الاستوائية الجافة الى انتظام ضغط الهواء الجوى حول الكرة الأرضية، حيث يوجد نطاق من الضغط المنخفض بالمناطق الجافة غير البعيدة من خط الاستواء. وتتميز هذه التشكيلات من الضغط الشبه دائمة بالجفاف والهدوء الذى غالبا ما يمنع من تكون السحب وبالتالي هطول الأمطار.

أما الصحارى والسهب الأبعد قليلا من خط الاستواء فهي لا تتميز بكتل هوائية هادئة مع الضغط المرتفع، بل ان جفافها راجع الى وقوعها في عمق الكتل القارية بعيدا عن المحيطات. وبالإضافة الى ذلك فإن سلاسل الجبال العالية الواقعة في مسار الرياح تعمل على منع وصول الجبهات الهوائية المحملة بالماء. ففي أمريكا الشمالية تعمل سلسلة جبال الشواطىء وسييرا نيفادا وجبال الكاسكيد كحائل. أما في قارة آسيا تمنع سلسلة جبال الهيمالايا رياح الصيف الموسمية المحملة بالهواء الرطب من المحيط الهندى من الوصول بعيدا داخل القارة. ولضيق رقعة الأرض بالمناطق المتوسطة البعد من خط الاستواء بنصف الكرة الجنوبي فإن الصحارى والسهب غير منتشرة في هذه المناطق عدى الطرف الجنوبي لأمريكا الجنوبية التي تقع في ظل المطر لجبال الانديز الشاهقة.

ما المقصود بالجافة؟

ما هو المقصود بكلمة الجافة؟ أحيانا تعرّف برقم لقياس

تبقى منه مساره الى باطن الأرض. أما الأنهار القليلة التي تشق الصحراء مثال نهري النيل وكولورادو فإن مصدرها يكون خارج الصحراء، وهو غالبا ما يقع، في مناطق جبلية تكثر فيها الأمطار. وهنا يكون مصدر المياه كافٍ لمعادلة النقصان في كمية المياه تحت ظروف مجرى النهر الصحراوية حيث أن نهر النيل يقطع مسافة تقدر بألفي كيلومتر من الصحراء دون التحاق رافد واحد به.

وبالرغم من ندرة المياه الجارية بالصحراء، فإنها العامل الرئيسي للتعرية، وذلك على عكس ما يعتقد بأن دور الرياح هو الأهم في نحت مظاهر التضاريس بهذه المناطق. وتعتبر الرياح ذات فعالية قصوى في المناطق الجافة دون غيرها غير أن المياه الجارية في هذه المناطق هي العامل الأساسي في تشكيل مظاهر السطح بها. وتتركز بالتالي أهمية الرياح في نقل وترسيب الرسوبيات واستحداث وبناء الكثبان الرملية كما سنرى في باقى هذا الفصل.

نقل الرياح للرسوبيات

تستطيع الرياح المتحركة، شأنها في ذلك شأن المياه الجارية رفع الحطام الصخري غير المتناسك ونقله من مكان الى آخر. وتتحرك الرياح بشكل مضطرب كما هو الحال بالجداول والأنهار، وتزيد سرعتها كلما زاد ارتفاعها عن سطح الأرض. وتقوم بنقل الرسوبيات الدقيقة وهي معلقة بينما تنقل الأحجام الأكثر ثقلا كحمولة أرضية. وهناك إختلافان مهمان بين طرق النقل بالرياح والمياه. الأول أن كثافة الرياح أقل من كثافة الماء وعليه فهي أقل قدرة على رفع ونقل الأحجام الكبيرة. والثانى هو أن الرياح غير محصورة في مجارى معينة وتستطيع الانتشار على مساحات واسعة وعلى ارتفاع كبير بالهواء الجوى.

الحمولة الأرضية

لقد أثبتت المشاهدة والتجارب الحقلية باستعمال أنفاق الرياح أن الرمال، وهي حمولة الرياح الأرضية، تنتقل

الكبرى للتعرية الكيميائية تحت ظروف المناخ الرطب. وحيث أن محصلة التعرية بالصحارى تتكون معظمها من حطام صخور ومعادن لم يتبدل تركيبها الكيميائي، فإننا نخلص الى القول بأن التعرية الميكانيكية هي نسبيا أكثر أهمية بالمناطق الجافة منها في المناطق الرطبة. ويرجع ذلك لعدم وجود الرطوبة وندرة الأحماض العضوية الناتجة عن تحلل النباتات. والتعرية الكيميائية ليست غائبة كليا عن المناطق الصحراوية، فعلى المدى الطويل يتكون الطين وطبقة رقيقة من التربة وكثير من معادن السليكون الحديدية التي تتأكسد مضيئة لونا صديدياً يميز البعض من الملامح الصحراوية.

وفي معظم الأحوال تفتقر مجارى الأودية في الصحارى الى المياه (شكل 12 - 3 أ). وكثيرا ما يلاحظ عابر الصحراء الجسور الممدودة فوق مجارى أودية خالية من الماء. ولكن عندما تمطر في هذه المناطق، فإنها غالبا ما تفوق كمية المياه المتساقطة في وقت قصير ما يمكن أن يتخلل منها الى باطن الأرض. وفي غياب غطاء نباتي فإنه لا يوجد ما يعوق جريان الماء على السطح وبسرعة كبيرة كثيرا ما تؤدي الى ما يسمى بالطوفان المحلى (شكل 12 - 3 ب). فالفيضان في أى نهر قد تمر عدة أيام ليصل الى دروته وكذلك ليهبط ثانية الى ما كان عليه بينما الفيضانات في الصحراء تظهر فجأة وتختفى بنفس السرعة. وحيث أن مكونات سطح الأرض غير مثبتة بغطاء نباتي فإن التعرية الناجمة عن مثل هذه الأحداث تكون ذات تأثير كبير بالصحراء.

وعلى العكس من نظام الصرف المائي بالمناطق الرطبة، فإن مجارى المياه بالمناطق الجافة قلما تتصل ببعضها البعض لتكون روافد لمجرى رئيسى. بل انه من خصائص الصحارى أن تنتهى مجارى مياهها قبل وصولها الى البحار. ولعمق المنسوب المائي في المناطق الصحراوية فإنه نادرا ما يقوم بتغذية المجارى المائية على السطح.

وفي غياب مصدر دائم يغذى هذه المجارى المائية فإنها تحت تأثير البخر ينضب محتواها المائي بسرعة في حين يجد ما



شكل 12 - 3

طوفان محلي . (أ) - خلال فترة الجفاف. (ب) - بعد هطول المطر.



شكل 12 - 4

سحابة تكونت بوثب حبيبات الرمل صاعدة الجانب الطفيف الانحدار لأحد الكتبان الرملية.

قدرت النسبة المنقولة بهذه الطريقة بما يقارب 20 - 25 في المائة من حجم الرمال المنقولة في عاصفة رملية.

الحمولة المعلقة

على عكس حمل الرياح الرمال فإنه يمكنها أن تحمل الغبار الى ارتفاعات شاهقة بالغلاف الجوى. وحيث أن الغبار بصورة عامة يتكون من جزيئات مفلطحة ذات مساحة سطحية كبيرة نسبة الى وزنها، فإن اضطراب الرياح يعمل على معادلة شد الجاذبية، مما يؤدي الى بقائها معلقة مدة طويلة. وبالرغم من أن كلا من الغرين والطين يمكن نقل حبيباتها بحمولة معلقة، إلا أن الغرين يمثل معظم مكونات الحمولة المعلقة حيث أن التعرية الكيميائية في الصحارى ينتج عنها كميات ضئيلة من الطين.

والحبيبات الدقيقة سهلة النقل بواسطة الرياح غير أن الصعوبة تكمن في إنتزاعها من مكانها. والسبب في ذلك أن

بواسطة القفز على السطح وتسمى هذه الوسيلة بالوثب. وتبدأ حركة الحبيبات عند وصول الرياح الى سرعة تكفى لتخطى سكونها. وفي البداية تتدحرج الحبيبات على السطح حتى تصطدم بحبة أخرى مما يؤدي الى قفزها في الهواء حيث يتم دفعها الى الأمام بواسطة الرياح الى أن تهبط ثانية تحت تأثير الجاذبية. وعند إرتطامها بالأرض إما أنها تعود للقفز مرة أخرى أو أنها تدفع بحبة أخرى الى الهواء. وهكذا في وقت قصير تبدأ سلسلة من الوثبات لتدفع بكمية كبيرة من الرمال إلى الحركة (شكل 12 - 4).

وحبوب الرمال المتحركة وثبا لا تنتقل بعيدا من سطح الأرض. فحتى في حالة الرياح القوية فإن ارتفاعها لا يتعدى المتر. أما في الظروف العادية فإن ارتفاعها لا يتجاوز النصف متر (شكل 12 - 5). أما الأحجام الأكبر، التي لا تستطيع الحبوب الأخرى الواثبة على رفعها من سطح الأرض، فإنها تعمل على دفعها الى الأمام دون رفعها. وقد



شكل 12 - 5

صخر جرانيت تم قطع قاعدته
بواسطة الرياح. وحيث أن
حبيبات الرمل لا ترتفع كثيرا عن
السطح يلاحظ أن الجزء السفلي
فقط قد تأثر.



شكل 12 - 6

عاصفة غبار. لقد كانت مثل هذه
العواصف كثيرة الحدوث نسبيا
أثناء الثلاثينات من هذا القرن في
منطقة السهول الضخمة
الأمريكية.

ذلك الطريق في منطقة جافة في يوم عاصف فإن كمية الغبار
المتحرك بها لا تذكر إذا تركت وشأنها، إلا أن مرور سيارة
على هذه الطريق يدفع طبقة الغبار الرقيقة بها إلى الحركة
مكونة سحابة كثيفة.

كلا من الغرين والطين يوجد في طبقة رقيقة على سطح
الأرض، حيث تبلغ سرعة الرياح صفرا. وعليه فإن الرياح
وحدها لا تستطيع رفع هذه المكونات دون الاعتماد على
الرمال الواثبة في ذلك أو أي عامل آخر يحرك سكونها. ومثال



شكل 12 - 7

بقعة نفخ بنبراسكا. وتدل البقايا التي يقف خلفها الحصان على مستوى منسوب الأرض قبل تأثير الرياح.

والعامل الذي يحّد من عمق هذه الأحواض هو مستوى المنسوب المائي حيث أن الرطوبة والنباتات تقف مانعا أمام تعميمها.

وفي بعض المناطق الصحراوية تنتشر أحجام كبيرة من الحصى التي لا تستطيع الرياح نقلها في شكل طبقة على السطح تسمى رصيف الصحراء. ويتكون عندما تقوم الرياح في المنطقة برفع ونقل الاحجام الصغيرة وترك الحصى فقط مكونا رصيفا أرضيا (شكل 12 - 8). وعند تكوين رصيف الصحراء وهي عملية قد تأخذ مئات السنين تكون حاجزا أمام التعرية بالانكماش.

وتعمل الرياح على التعرية بواسطة الكشط شأنها في ذلك شأن المياه والجليد. ففي المناطق الجافة الى جانب المناطق الساحلية تعمل الرياح المحملة بالرمال الى حفر وتلميع الصخور المتكشفة على السطح. وكثيرا ما ينسب الى الكشط أعمال فوق مقدّره. فالأشكال المعقدة للأعمال الصخرية التي تقف متزنة فوق قواعد صغيرة هي بالتأكيد ليست من نتائج الكشط وحيث أن الرمال قلما تنتقل على

وبالرغم من أن الحمولة المعلقة عادة ما يتم ترسيبها على مسافة ليست بالبعيدة من مكانها الأصلي. فالرياح القوية تستطيع نقل كميات كبيرة منها مسافة بعيدة (شكل 12-6). ففي الثلاثينات من هذا القرن لوحظ إنتقال الغرين من كانساس بوسط أمريكا الشمالية الى شمال المحيط الأطلسي ومن الصحراء الكبرى الى جزر الأنديز الغربية.

التعرية بواسطة الرياح

تعتبر الرياح غير ذات أهمية كعامل تعرية اذا ما قورنت بالمياه والجليد. فحتى في الصحارى فإن قليلا من تضاريسها تعتبر الرياح مسئولة مسئولية مباشرة عن تشكيلها. ولا تقتصر الرياح في عملها بالتعرية على المناطق الجافة والشبه جافة، بل إنها فقط أكثر فعالية في هذه المناطق. ففي المناطق الرطبة يعمل البلل على لصق الأجزاء ببعضها البعض، كما تشد النباتات التربة الى الأرض مما يجعل عمل الرياح غير ذي أهمية. وأهم متطلبات عمل الرياح حتى تكون ذات فاعلية هي الجفاف وندرة الأعشاب. فمثلا في الولايات المتحدة عقب موجة الجفاف خلال الثلاثينات اشتد عمل الرياح بسهولها الوسطى حتى سميت المنطقة بكرة الغبار.

والانكماش طريقة أخرى للتعرية بواسطة الرياح وهو رفع ونقل المواد غير المتناسكة. وقد لا تلاحظ آثار التعرية بالانكماش حيث أن النقصان يكون من كل السطح في آن واحد ولكن نتائجها قد تكون ذات أهمية حيث أنها مثلا خلال العواصف الرملية المذكورة في المثال أعلاه عملت الرياح على نقل ما يقارب المتر من الرسوبيات خلال سنوات معدودة. وكثيرا ما تتكون منخفضات ضحلة نتيجة للتعرية بالانكماش تسمى بقع النفخ (شكل 12 - 7). ومثال ذلك آلاف البقع المنتشرة من تكساس الى مونتانا، التي يتراوح حجم الواحدة منها من متر واحد في عمقها وثلاثة أمتار في قطرها الى خمسين مترا عمقا واتساعا ولعدة كيلومترات.



شكل 12 - 8

رصيف الصحراء يتكون من
فتات صخري مزوى.



شكل 12 - 9

مشغولات الرياح في الصحراء .

ويكون هنا الجانب المقابل للرياح مصقولا ومنقرا ذا حواف حادة. وقد يكون للحصاة أكثر من وجه مصقول وذلك لتغير وجهة الرياح أو لتبدل وضعها بالنسبة الى اتجاه الرياح.

ارتفاع يزيد على المتر فانه من الواضح أن تكون مقدرتها على التعرية محدودة عموديا. غير أن الكشط يقدم أشكالاً صخرية مختلفة تسمى مشغولات الصحراء (شكل 12 - 9)



شكل 12 - 10

قمة كتيب رملي.

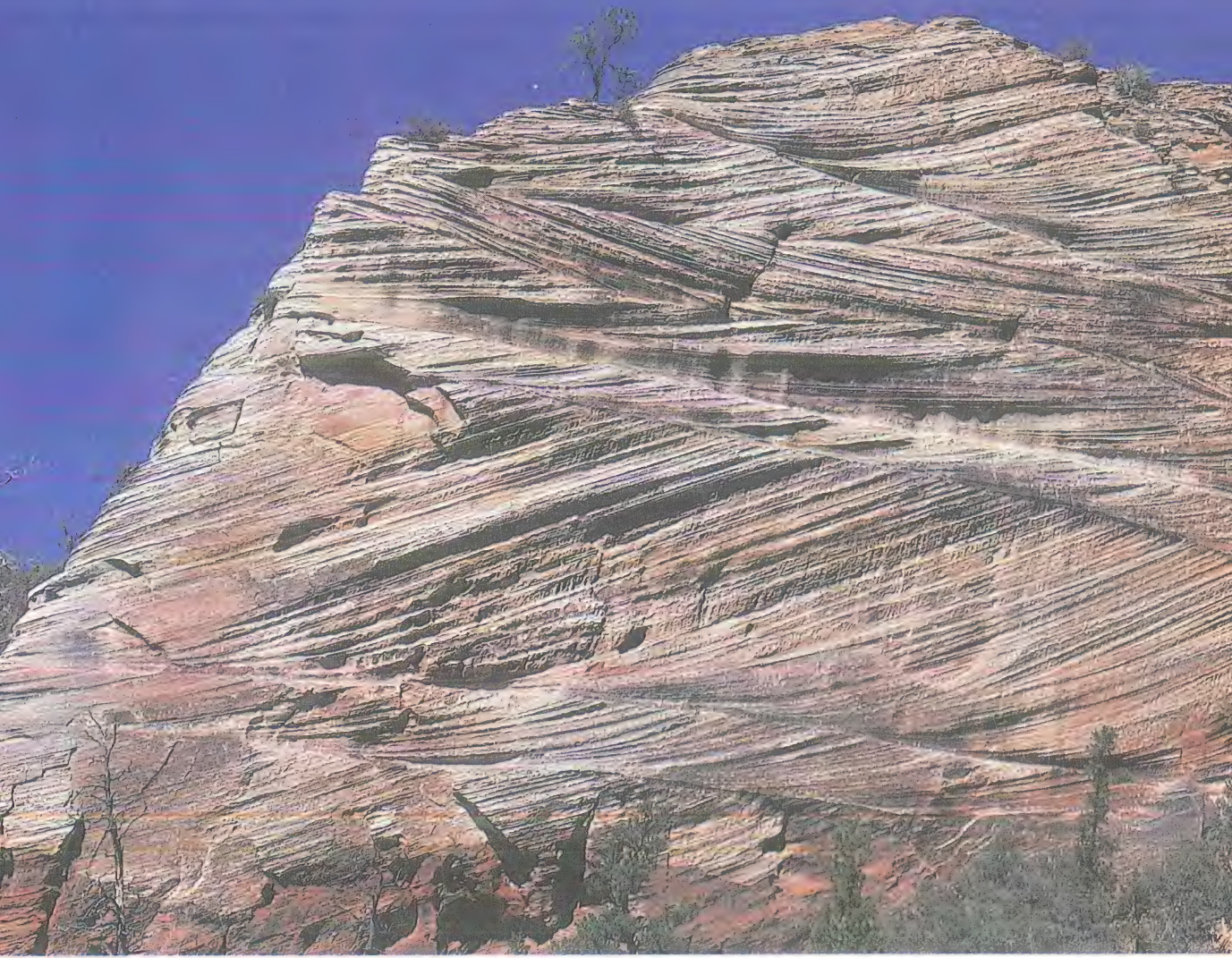
رسوبيات الرياح

لا تعتبر الرياح ذات أهمية كبيرة كعامل مؤثر في تغيير ملامح الطبيعة، ولكنها عامل ترسيب مهم في بعض المناطق. وتتميز رسوبياتها كثيرا من المناطق الجافة والسواحل الرملية حول العالم. ورسوبيات الرياح نوعان: (1) روابي وهضاب

رملية من حمولة الرياح الأرضية. (2) طبقة رقيقة مترامية الأطراف من الغرين المتراكم من الحمولة المعلقة.

الرسوبيات الرملية

تشابه الرياح المياه الجارية حيث أنها تلقى بحمولتها عند نقصان سرعتها وتلاشى طاقتها على الحمل. وعليه تتم



شكل 12 - 11

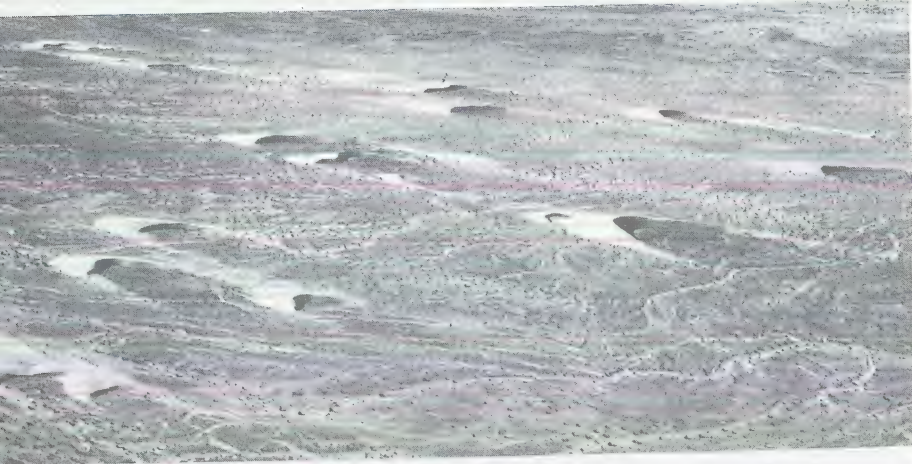
طبقات متقاطعة.

من الرمال. وإذا ما استمر هبوب الرياح مع تواجد مصدر كافٍ للرمل فإن الروابي الرملية المتكونة تنمو إلى كتبان رملية.

وعند عمل قطاع في كتيب رملي يتضح أنه غير متماثل، حيث أن الجانب المحجوب عن الرياح أكثر ميلاً من الجانب الآخر. ويتحرك الرمل صاعداً الجانب الأقل انحداراً بواسطة الوب. وبعد القمة مباشرة تنقص سرعة الرياح ويتراكم الرمل. ومع زيادة كمية الرمل يزداد الانحدار. وبالطبع ستتدرج كمية منه تحت تأثير الجاذبية. ولهذا يسمى الجانب المحجوب عن الرياح بوجه الانزلاق. وعادة ما يشكل وجه

عملية الترسب كلما برز عائق في سبيل مجراها والذي قد يؤدي إلى نقصان سرعة حركتها. وخلاف الراسب الغريني الذي قد يكون طبقة رقيقة على رقعة واسعة فإن الرياح عموماً تلقى بحمولتها من الرمال في روابي وهضاب تسمى الكتبان الرملية (شكل 12 - 10).

وعند اصطدام الرياح بعائق كصخر أو مجموعة نباتات فإنها تلف من حولها ومن فوقها تاركة منطقة ظل من ورائها ونطاقاً أصغر أمامها تقل فيه سرعة الرياح عما حولها. وتتراكم بعض حبيبات الرمل الوائبة في منطقة الظل هذه ومع زيادة تراكم الرمل يتكون حاجز يعمل على حجز كمية أكبر



شكل 12 - 12

كثبان هلالية. يدل الجانب
الضعيف الانحدار على اتجاه
هبوب الرياح.

أنواع الكثبان الرملية

ليست الكثبان الرملية أكواماً متناثرة من الرسوبيات ولكنها منتظمة في ترتيب واضح. فقد أشار في هذا الشأن أحد الدارسين الأوائل للكثبان الرملية وهو المهندس البريطاني ر. أ. باجنولد حيث قال بأن المشاهد لا يخلو من الدهشة لبساطة تكوينها ورتابة تعددها ونظام تشكّلها. كما أوضح أنه في بعض الأماكن تتحول الملايين من أطنان الرمال في حركة جد منتظمة محتفظة بشكلها.

الكثبان الهلالية: وهي كثبان منفردة على شكل هلال تشير رأسها في اتجاه حركة الرياح (شكل 12 - 12). وتتكون هذه

شكل 12 - 13

كثبان رملية عرضية.

الانزلاق زاوية تبلغ حوالى 34° ، وهى زاوية السكون للرمال غير المتماسكة. وزيادة تراكم الرمال مع انحدار جزء منها على وجه الانزلاق يؤدي الى هجرة الكثيب الرملى البطيئة في اتجاه حركة الهواء.

ومع تراكم الرمال على وجه الانزلاق تتكون طبقات مائلة في اتجاه هبوب الرياح تسمى الطبقات المتقاطعة (شكل 12 - 11). وعند دفن الكثبان الرملية تحت طبقات رسوبية أخرى وتتحول الى جزء من سجل الطبقات الرسوبية تغيب ملامح شكلها غير المتماثل، غير أن الطبقات المتقاطعة تبقى على حالها. وبدراسة اتجاه هذه الطبقات يمكن للجيولوجيين تحديد معدل اتجاه الرياح القديمة. وهذه المعلومات مع باقى المعطيات تمكننا من تصور المناخ عبر الزمن الجيولوجي مما يؤدي الى تحديد مواقع الألواح المتحركة للقشرة الأرضية في تلك الفترة.





وهنا ينتقل الرمل من داخل هذه المنخفضات متراكما في حواف منحنية ترتفع بزيادة عماق بقع النفخ.

الراسب الغرينى

يغطى تضاريس بعض المناطق لحاف من الغرين تراكم بفعل الزوابع الرملية على مدى فترة من الزمن قد تصل الى آلاف السنين. ويعرف هذا بالراسب الغرينى. وكما يلاحظ في الشكل 12 - 14 فإن هذا النوع من الرسوبيات يعطى مقاطع عمودية عند إختراقه بمجارى الأنهار أو مسار الطرقات العامة. ويفتقر الى أى طبقات رسوبية واضحة. وبالنظر الى توزيع الراسب الغرينى يتضح أن لها مصدران: الصحارى أو رسوبيات الجليد المنقولة. وأكثر رسوبيات العالم الغرينية سمكا ومساحة توجد بشمال وغربى الصين حيث أن سمك الكثير منها يبلغ حوالى 30 مترا، ويصل بعضها الى اكثر من 100 متر. وترجع تسمية النهر الأصفر (هوانج هو) وكذلك البحر الأصفر بالمنطقة المجاورة الى هذه الرسوبيات الدقيقة الصفراء البرتقالية اللون. ومصدر رواسب الصين الغرينية البالغة مساحتها ما يقارب 800,000 كيلومتر مربع هو أحواض الصحارى الرسوبية المترامية الأطراف بأواسط آسيا.

والراسب الغرينى بالولايات المتحدة ينتشر بمناطق عديدة تشمل ذاكوذا الجنوبية ونبراسكا وأيوا وميسورى والنيوى وكذلك أجزاء من سهل كولومبيا. ولا يرجع تطابق توزيع هذه الرسوبيات والمناطق الزراعية بالوسط الغربى وشرقى ولاية واشنطن الى الصدفة. فهذه الرسوبيات تعتبر من أخصب أنواع التربة فى العالم. وتختلف الرسوبيات الغرينية بالولايات المتحدة وأوروبا عن مثيلاتها بالصين فى كونها نتاج غير مباشر للتجلد، حيث أن مصدرها رسوبيات الجليد المنقولة. فعند انحسار جليد المجالد كانت الرسوبيات الناتجة عن ذوبان الجليد تملآن مجارى الكثير من الأنهار ومن ثم حملت بواسطة الرياح الغربية القوية من السهول الفيضانية العارية وترسبت فى طبقة رقيقة غطت الضفة

الكتبان فى مناطق يكون فيها مصدر الرمال محدوداً وفى أرضية صلبة مسطحة نسبيا عارية من الغطاء النباتى. وتهاجر الكتبان الرملية الهلالية ببطء فى اتجاه الرياح بمعدل يصل الى 15 مترا فى السنة. وهى عموما متوسطة الحجم أو يصل اكبرها الى ارتفاع يبلغ 30 مترا أما أقصى اتساع لرأسيتها فيبلغ 300 متر. ويكون الهلال متاثلا فى حالة ثبات اتجاه الرياح ومتفاوت الرأسين طولاً عند تغير اتجاه الرياح.

الكتبان العرضية: فى المناطق التى تقل أو تنعدم فيها النباتات مع وجود مصدر كافٍ للرمل تتكون الكتبان فى سلسلة طويلة على هيئة روابى تفصلها أغوار فى اتجاه عمودى على اتجاه حركة الرياح، مما أعطاها إسم الكتبان العرضية (شكل 12 - 13). ومعظم الكتبان الرملية الساحلية من هذا النوع، الى جانب أنها تكثر فى المناطق الجافة حيث يطلق على امتداد سطحها المتموج بحر الرمال.

الكتبان الطولية: والكتبان الطولية التى تعرف أيضا بكتبان السيف عبارة عن روابى طويلة من الرمال موازية لاتجاه الرياح فى أماكن يكون فيها مصدر الرمل محدود. ويظهر أن اتجاه الرياح يكون متغيرا ولكن فى حدود 90 درجة أو أقل. وبالرغم من أن بعضها يرتفع من ثلاثة الى أربعة أمتار وبطول عدة عشرات من الأمتار فإنها فى الصحارى الكبيرة تصل الى أحجام مهولة. فمثلا فى أجزاء من الشمال الأفريقى والجزيرة العربية وأواسط استراليا تصل الكتبان الطولية الى ارتفاع 100 متر وإلى امتداد يزيد عن 100 كيلومتر.

كتبان قطاعات المكافئة: وتختلف كتبان قطاعات المكافئة عن بقية الكتبان فى غطاءها النباتى غير المتكامل. وهى تشبه الكتبان الهلالية فى شكلها إلا أن رؤوسها تشير الى عكس اتجاه الرياح. وتتكون كتبان القطاعات المكافئة فى المناطق الساحلية حيث تكون الرياح قوية وتتوفر كميات كافية من الرمال. وفى حالة العبث بالغطاء النباتى لهذه الكتبان تعمل التعرية بالانكماش على حفر بقع النفخ فوقها



شكل 12 - 14

راسب غرينى بالقرب من نهر الميسيسبى.

الأودية التى لا يصل مداها خارج الصحراء. ففي الولايات المتحدة مثلا المنطقة المعروفة منطقة الأحواض والجبال وهى تشمل جنوب اوريجون وكل من نيفادا وغرب يوتا وجنوب كاليفورنيا الى جانب جنوب أريزونا ونيومكسيكو خير مثال على ذلك. فتسمية الأحواض والجبال ملائمة للمنطقة البالغ مساحتها ما يقارب 800,000 كيلومتر مربع بها أكثر من مائتى سلسلة جبلية صغيرة تتراوح ارتفاعاتها من 900 الى 1500 متر فوق مستوى الأحواض التى تفصلها. وفي هذه المنطقة كما فى مناطق أخرى حول العالم تعمل التعرية بدون أن يكون البحر الملاذ النهائى لنتائجها، حيث أن نظام الصرف المائى هو داخلى ومحلى. وحتى فى المناطق

الشرقية من الوادى. ويؤكد منشأها هذا زيادة سمكها وحجم حبيبات الراسب الغرينى عند الجانب المحجوب عن الرياح من مخارج نظام الصرف الرئيسى بالمجالد. وما يؤكد ذلك أيضا نقصان السريع فى سمكها بزيادة بعدها عن مجارى الأنهار، زد على ذلك أن الحبيبات المديبة والناجمة عن التعرية الميكانيكية المكونة للراسب الغرينى تشابه تماما دقيق الصخر الذى يتكون بفعل الطحن الجليدى.

تطور مظاهر التضاريس الصحراوية

تفتقر الصحارى فى العادة الى مجارى مائية دائمة. أى أنها تمتاز بنظام صرف داخلى وهذه تشكيلة من مجارى

يدوم بقاؤها أياما فقط أو على الأكثر بضعة أسابيع. وتعرف الطبقة المسطحة الجافة التي تتركها البحيرة بالبلايا وهي تتكون عادة من غرين وصلصال وأحيانا بعض الأملاح المتبقية من عملية البخر (شكل 12 - 17). غير أن رسوبيات الأملاح هنا تكون غير عادية مثال بورات الصوديوم والمعروف بالبورق.

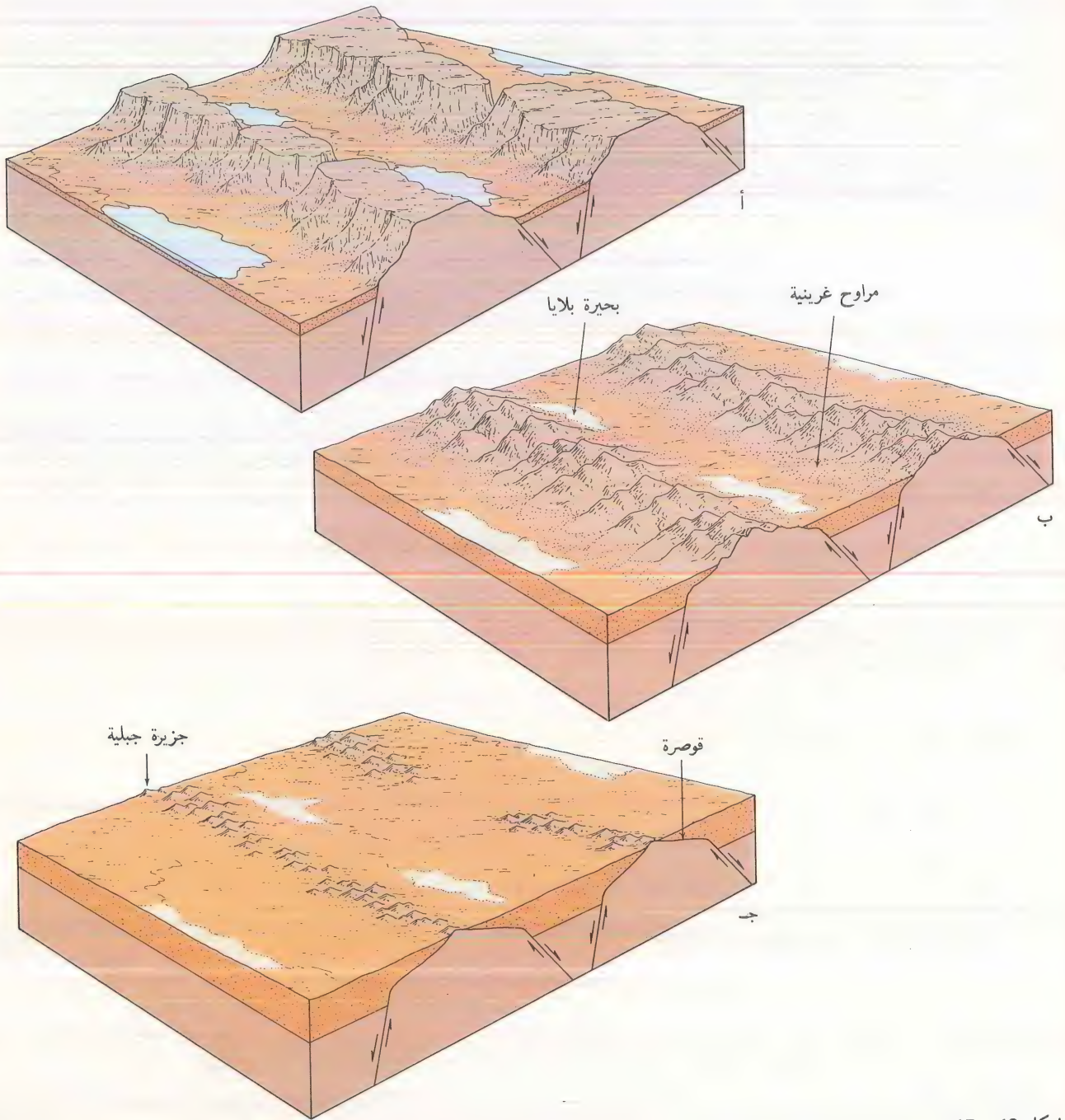
ومع مرور الزمن تتراجع مقدمة الجبل حيث يستمر تأكلها مكونة منحدرًا صخريًا منبسطًا محاذيًا لمقدمة الجبل شديدة الانحدار وتسمى القوصرة. والقوصرة ظاهرة من ظواهر التعرية عادة ما تكون مغطاة بطبقة رقيقة من الرسوبيات بفعل المياه الجارية. أما موضوع الجدل هنا هو كيف نحتت المياه القوصرة.

وباستمرار عملية تقطيع الجبل الى مجموعة من الوديان بينها فواصل حادة القمم مع ما يرافقها من عمليات ترسيبية، فإن التضاريس تستمر في الاضمحلال شيئا فشيئا. ويؤدي انحسار الكتلة الجبلية الى نمو مساحة القوصرة التي تغطي فيها بعد، وبالتالي فان خلال المراحل الأخيرة من عملية التعرية يتحول الجبل الى نتوءات صخرية كبيرة وسط القوصرة. وتعرف هذه النتوءات المعزولة وسط صحراء قديمة بالجزر الجبلية. وكل هذه المراحل من تطور مظاهر التضاريس بالمناطق الجافة والمبينة في الشكل 12 - 15 تعرف بمنطقة الحوض والجبال المذكورة أعلاه. فهناك الجبال المرفوعة حديثا والمتأثرة بالتعرية في مرحلة جد مبتدئة وذلك في جنوب أوريغون وشمال نيفادا. أما المرحلة المتوسطة فتمثلها منطقة جنوب نيفادا ووادي الموت بكاليفورنيا. أما المرحلة المتقدمة بجزرها الجبلية والقوصرة المتسعة فتوجد في جنوب أريزونا.

الصحراوية التي توجد بها أنهار يصل مداها الى البحر فإن روافدها إن وجدت تكون قليلة. وعليه فإن شريطاً ضيقاً فقط يحف مجرى النهر يمكن أن يكون مستوى سطح البحر الحد النهائي لتعمقه.

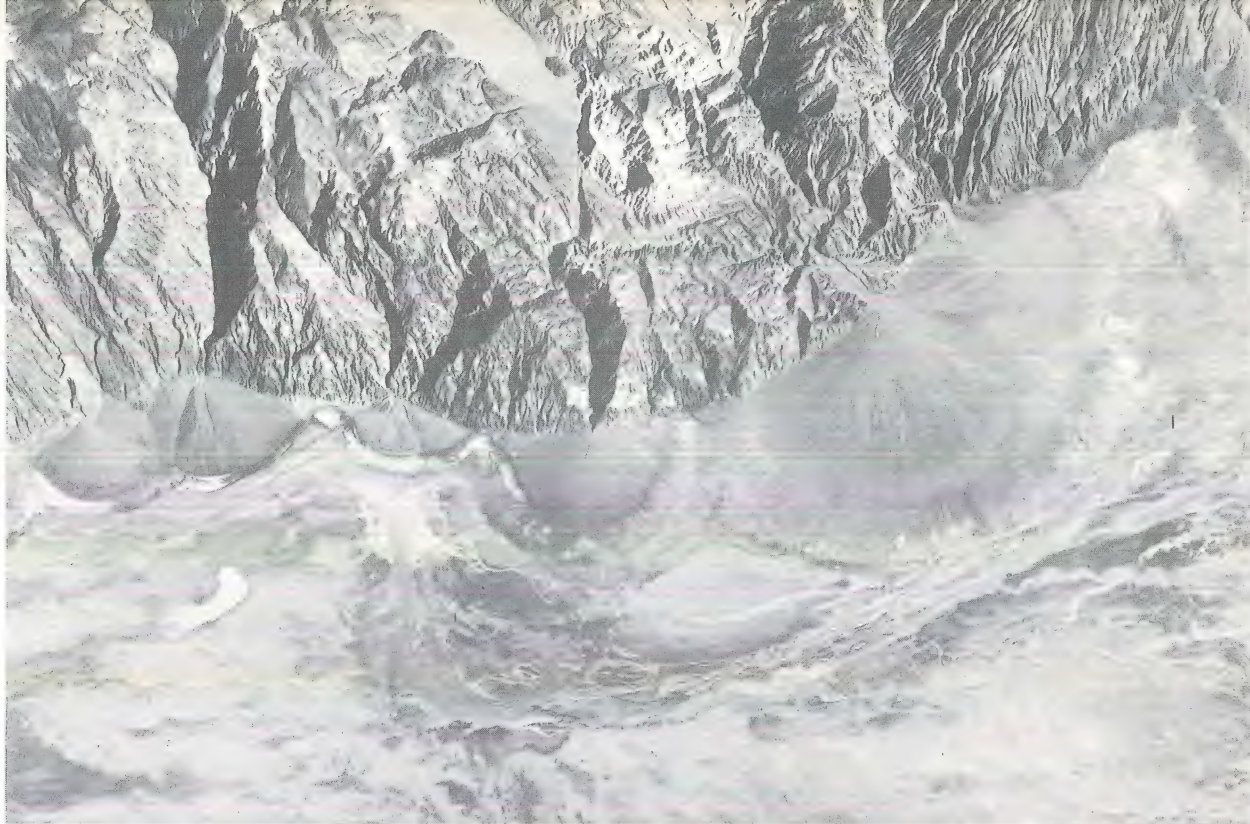
والشكل 12 - 15 يصور خطوات تشكّل تضاريس جبلية مثال منطقة الحوض والجبال المذكورة أعلاه. فبعد مرحلة إرتفاع الجبال عملت المياه الجارية على نحت الكتل الصخرية العالية وترسيب كميات من الحطام الصخري في الحوض الترسيبي. وفي هذه المرحلة الأولية تكون التضاريس مرتفعة كلما استمرت عملية التعرية في خفض مستوى ارتفاع الجبال وملء الحوض كلما نقص الفارق في الارتفاع.

وأحيانا تسقط الأمطار وتندفع مياهها في سيل جارف على الأخاديد الجبلية محملة بكميات كبيرة على الجوانب عند المنحدرات الطفيفة بقدم الجبل. وسرعان ما تفقد سرعتها مفرغة حملتها على مسافة قصيرة. ويكون نتاج ذلك مخروطا من الحطام الصخري يترسب عند مصب الأخدود ويسمى المروحة الركامية (شكل 12 - 16). وحيث أن الحطام الصخري الأكبر حجما يترسب أولا فان رأس المروحة يكون أكثر انحدارا أى ما يقارب 10 - 15°. وفي الاتجاه الأقل ارتفاعا يقل عموما حجم الرسوبيات كما يقل الانحدار حتى تندمج مع قاع الحوض الترسيبي. وبتفحص سطح المراوح يتضح وجود جدائل من القنوات تنتقل مجارى المياه بها لردم القنوات السابقة بالرسوبيات. وبمرور السنين تكبر المروحة الغرينية في الحجم وتندمج مع المراوح المجاورة مكونة ما يسمى بالبجادا عند قدم الجبل. ونادرا ما تكون المياه كافية لتخترق البجادا الى وسط الحوض الترسيبي مكونة بحيرة ضحلة تسمى بحيرة البلايا. وهذه البحيرات مؤقتة حيث



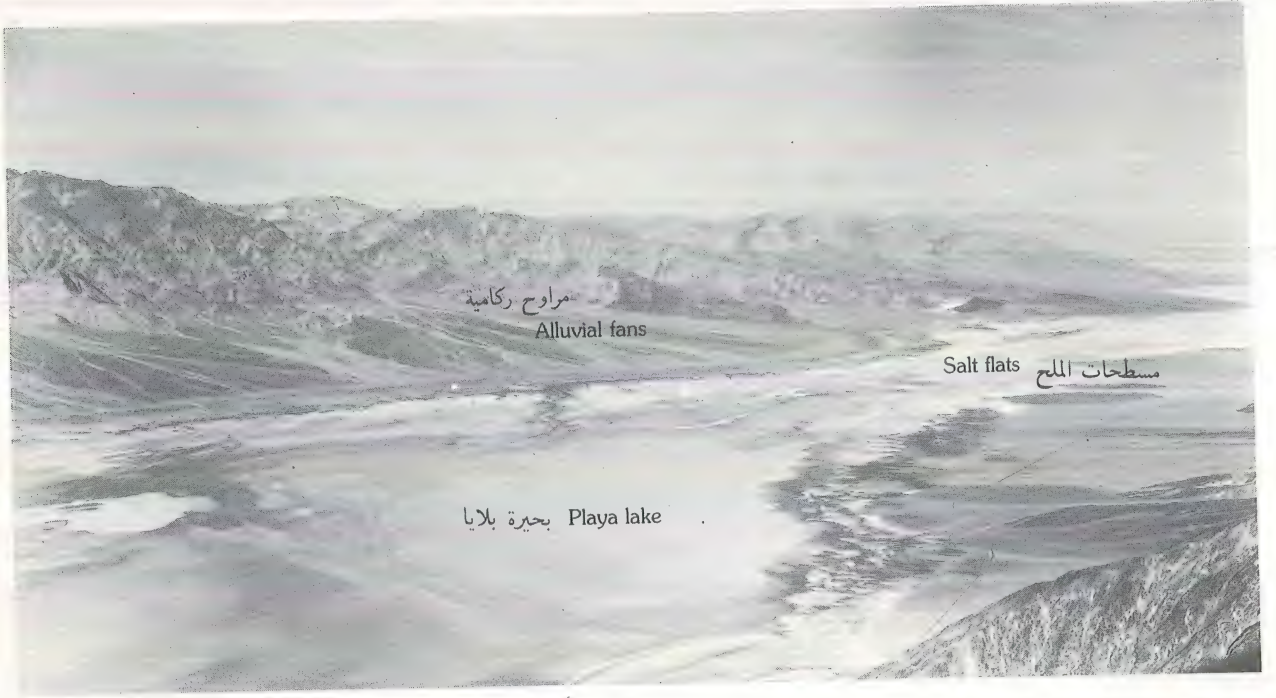
شكل 12 - 15

خطوات تطور المظاهر الطبيعية بالجبال الصحراوية. تتناقص التضاريس باستمرار عملية تعرية الجبال والترسيب في المنخفضات. (أ) - مرحلة باكراً. (ب) - مرحلة متوسطة. (ج) - مرحلة متأخرة.



شكل 12 - 16
(أ) - منظر جوى لمراوح زكامية
بوادى الموت بكاليفورنيا. يعتمد
حجم المروحة على حجم حوض
سرف المياه. وينمو هذه المراوح
واندماجها تتكون البجادا. (ب) -
خريطة تبين مراوح غرينية
بكاليفورنيا.

ب



شكل 12 - 17

البلايا بحيرة منبسطة وجافة. تتكون بها بحيرة بلايا مؤقتة بعد هطول الامطار أو ذوبان الثلج من الجبال المجاورة. تترسب الاملاح في هذه البحيرة بعد بخر مياهها.

أسئلة للمراجعة :

- 1 - تتكون معظم الصحارى من مساحات شاسعة من الكثبان الرملية. اذكر مدى صحة هذه العبارة مع بعض الأمثلة لتفنيد اجابتك.
 - 2 - ما هو اتساع الصحارى والسهول حول الكرة الأرضية؟
 - 3 - ما هو السبب الرئيسى وراء تكون الصحارى الشبه قارية؟ الصحارى متوسطة البعد عن خط الاستواء؟
المنطق الجوى حول الكرة الأرضية
 - 4 - فى أى من نصف الكرة الأرضية (الشمال أو الجنوب) تعتبر الصحارى المتوسطة البعد عن خط الاستواء أكثر انتشارا؟
 - 5 - لماذا تكون تعرية الصخور بالصحارى محدودة؟
 - 6 - ما هى أكثر عوامل التعرية تأثيرا فى الصحارى؟
 - 7 - بماذا تتميز الوديان الصحراوية؟
 - 8 - صف طريقة نقل الرمال بواسطة الرياح. الى أى ارتفاع يمكن أن تصل الرمال المنقولة برياح قوية؟
 - 9 - لماذا تعتبر الرياح أهم نسبيا كعامل تعرية بالمناطق الجافة منه فى المناطق الممطرة؟
 - 10 - ما هو العامل الذى يحد من عمق بقع النفخ؟
 - 11 - كيف تهجر الكثبان الرملية؟
 - 12 - هناك أربعة أنواع من الكثبان الرملية. أذكر نوع الكثبان فى كل من الحالات التالية:
- (أ) - تعرف فى بعض الأحيان بكثبان السيف.
 - (ب) - الكثبان التى تشير رؤوسها الى عكس اتجاه الرياح.
 - (ج) - روابى رملية طويلة تأخذ اتجاهها عموديا على اتجاه الرياح.
 - (د) - تتواجد غالبا فى المناطق الساحلية حيث يكون الرياح بقع النفخ.
 - (هـ) - كثبان وحيدة تشير رؤوسها الى اتجاه الرياح.
 - (و) - كثبان رملية طويلة تأخذ اتجاهها موازياً تقريبا لاتجاه الرياح.
- 13 - بالرغم من أن الكثبان الرملية أكثر رسوبيات الرياح شهرة فإن الراسب الغرينى ذا أهمية كبيرة فى بعض المناطق. ما هو الراسب الغرينى؟ وأين يوجد؟ وما هو منشأه؟

14 - لماذا لا يعتبر مستوى سطح البحر عاملاً مؤثراً في التعرية بالمناطق الصحراوية؟

15 - صف أشكال وخصائص كل من مراحل تطور الصحراء الجبلية مقدماً أمثلة عن كل مرحلة.

الكلمات الدالة :

cross beds	طبقات متقاطعة	playa lake	بحيرة بلايا
pediment	قوسرة	bajada	بجادا
dune	كثيب رملي	blowout	بقع النفخ
longitudinal dune	كثيب طولي	playa	بلايا
transverse dune	(كثيب السيف)	ventifact	مشغولات الصحراء
parabolic dune	كثيب مستعرض	deflation	تعرية بالانكماش
barchan dune	كثيب قطاع مكافئ	xerophyte	جافوف
abrasionn	كثيب هلالى	inselberge	جزيرة جبلية
alluvial fan	كشط	bed load	حمولة أرضية
dry climate	مروحة ركامية	suspended load	حمولة معلقة
interior drainage	مناخ جاف	loess	رسوبيات الغرين
saltation	نظام صرف داخلي	desert pavement	رصيف الصحراء
slip face	وشب		
	وجهة الانزلاق		

13



الشواطىء

13



عدة، مثال تعرية الأنهار والتجلد والنشاط البركاني مع حركة بناء الجبال.

الأمواج

تعتبر الرياح مصدر الطاقة الرئيسى الذى يشكل ويعدل فى الشواطىء عن طريق الأمواج. فالأمواج المنتقلة مسافات تبلغ المئات أو آلاف من الكيلومترات تجد فجأة ما يعترضها عن التقدم عند التقاء الماء باليابسة. وبعبارة أخرى فإن الشواطىء تمثل مواقع تصادم قوة لا تقاوم مع جسم لا يتحرك.

وتسمى تموجات سطح البحر بالأمواج. وهى تستمد طاقتها من الرياح فعند حركة الرياح بسرعة قد لا تصل الى 3 كيلومترات فى الساعة تحدث فى الحال أمواج صغيرة لا تلبث أن تختفى بهدوء الرياح وبالسرع التى تكونت بها. وعند زيادة السرعة عن 3 كيلومترات فى الساعة تتكون أمواج اكبر متقدمة فى اتجاه الرياح.

وتوصف الأمواج بمميزات موضحة فى الشكل 13 - 1. فنهاياتها العلوية تسمى قمم يفصل بين كل قمتين متجاورتين ما يسمى بالقاع. ويطلق على المسافة العمودية بين القمة والقاع بإرتفاع الموجة. أما المسافة الأفقية بين قمتين متتاليتين فسمى طول الموجة. وزمن الموجة هو الوقت اللازم لمرور قمتين متتاليتين بنقطة ثابتة. ويعتمد ارتفاع الموجة وطولها وزمنها على ثلاثة عوامل: (1) سرعة الرياح. (2) مدة هبوب الرياح. (3) الجهد أو المسافة التى انتقلها الرياح عبر جسم مائى مفتوح. وكلما زاد تحول الطاقة من الرياح الى الماء كلما ازداد ارتفاع الموجة الناقلة له. وفى المحيطات المفتوحة تعتبر الموجات ذات الارتفاع الذى يتراوح بين المتر والأربعة أمتار مألوفة جدا. غير أن العواصف قد تنتج أمواجا أعنى من هذه بكثير.

وحيث أن الرياح غالبا ما تكون مضطربة فإن ذلك ينعكس على أمواجها التى تكون غير منتظمة الارتفاع والطول. وعند توقف هبوب الرياح أو تغير اتجاهها. أو عند مغادرة الأمواج لمكان العاصفة تستمر الأمواج بغض النظر

الأمواج

تعرية الأمواج

انحراف الأمواج

الجرف الشاطئى والتيارات الشاطئية

تدخل الانسان فى العمليات المؤثرة فى الشواطىء

معالم الشواطىء

الشواطىء المغمورة

السواحل المنبثقة والمغمورة

المد والجزر

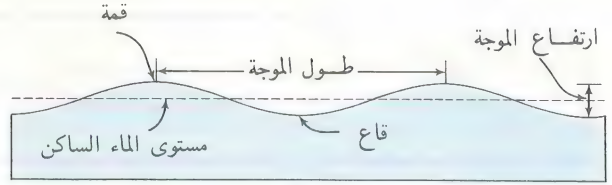
المد والجزر ودوران الأرض

المد والجزر وتوليد الطاقة

الماء بالبحار والمحيطات فى حركة دائمة. ويمكن للمشاهد ملاحظة حركتى المد والجزر على الشواطىء مع قدم الأمواج وانكسارها، والتى قد تكون منخفضة وهادئة أو قد تضرب الشواطىء بقوة وعنّف. وتعد الشواطىء مواقع للتداخل الحركى بين الأرض والبحر وخير دليل على إستمرار حركة مياه المحيطات والبحار فالشواطىء فى حركة تشكّل وتغيرٌ مستمرة تحت وطأة الأمواج. غير أن ذلك لا يكون واضحا فى نظرة عابرة. فهى فى يومنا هذا ليست فقط نتاج هجمات أمواج البحر المتتالية على اليابسة فحسب بل هى أيضا نطاق معقد ومميز لعمليات جيولوجية متعددة. فمثلا جميع الشواطىء قد تأثرت بارتفاع مستوى سطح البحر الناتج عن ذوبان الجليد بنهاية عصر البليستوسين. ومع تقدم البحر شيئا فشيئا تجاه اليابسة تكونت الشواطىء فوق ما سبقها من مميزات تضاريسية ناتجة عن عوامل جيولوجية

تعرية الأمواج تعمل على استقامة الشواطىء غير المنتظمة.

وتعمل الرياح على جر الماء قليلا الى الأمام مسببة في دورة المياه السطحية بالمحيطات. غير أن الطاقة الهوائية لا يقتصر تأثيرها على سطح الماء بل يمتد كذلك الى ما تحته. ونتيجة لعامل الاحتكاك فإن قدرة هذه الطاقة المؤثرة تتناقص بزيادة عمق الماء الى ما يقارب نصف طول الموجة، حيث تكون حركة جزيئات الماء لا تذكر. ويوضح هذا التناقص السريع في أقطار مدارات جزيئات الماء بالشكل 13 - 2.

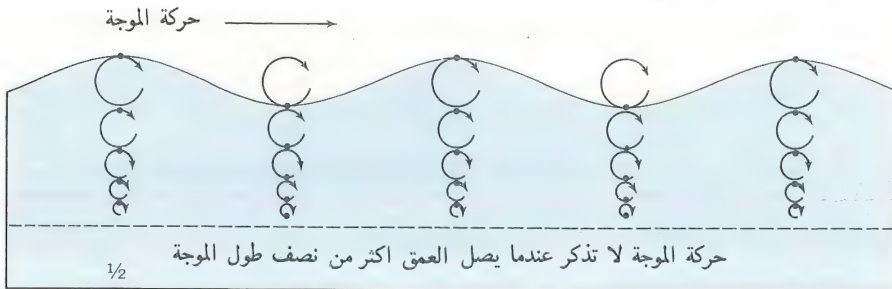


شكل 13 - 1
أبعاد الموجة ووصفها.

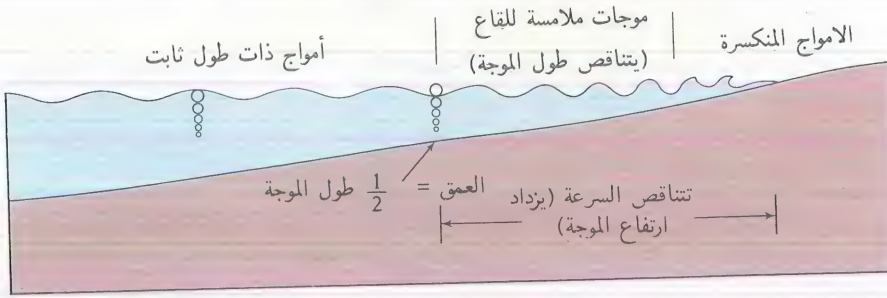
وتتأثر الموجات بمغادرتها الأعماق الكبيرة من الماء واقتربها من الشاطئ حيث تكون المياه ضحلة. وتلامس الموجة القاع عندما يصبح عمق الماء يساوي نصف طولها، وعندما تتناقص حركتها لاستعمال جزء من طاقتها في تحريك جزيئات الرسوبيات بالقاع الى الأمام والخلف. ومع تقدم الموجات تجاه الشاطئ تلحق السرعة منها بالتى سبقتها مسببة في نقصان طولها. وتتناقص سرعة الموجة وطولها تزداد ارتفاعا الى أن تصل نقطة حرجة حيث لا تستطيع مقدمة الموجة الشديدة الانحدار على إسنادها وبالتالي تنهار أو تنكسر (شكل 13 - 3). وتصبح الموجة عند هذا الحد موجة نقل حيث تنقل الماء متحركا تجاه الشاطئ. ويسمى الماء المضطرب الناتج عن إنهار الموجات عند الشاطئء بالمأمواج المنكسرة. وبلى اندفاع الماء على الساحل تراجعها تجاه البحر مرة أخرى في تشكيل معقد. ومع تقدم مياه البحر السطحية تجاه الشاطئء تتجه مياه الأمواج المستهلكة الى عرض البحر منتشرة على مساحة كبيرة أو في

عن موقع تكونها. وتتغير الأمواج تدريجيا وهى تغادر موقع تكونها حيث تعلق الأمواج المرتفعة الأقل منها طولا وارتفاعا وربما تنقل طاقة العاصفة الى أن تصل بها الى الشواطئ البعيدة. ولكون الأمواج عبارة عن خليط من عدة أنواع تكونت تحت مؤثرات مختلفة ثم تواجبت مجتمعة في وقت واحد فإن سطح البحر يعكس أشكالا معقدة وغير منتظمة. والأمواج التى نشاهدها عند الشواطئء هى خليط من أمواج أتت من مسافات بعيدة وأخرى تكونت محليا.

وفي البحار المفتوحة تختلف حركة الأمواج عن حركة جزيئات الماء بداخلها، حيث أن الحركة الى الأمام تقتصر على شكل الموجة دون الماء. فجزيئات الماء تتحرك في دوائر أثناء مرور الموجات (شكل 13 - 2). وبعد ذلك ترجع الجزيئات تقريبا الى سابق مواقعها الأصلية. ويمكن تفهم ذلك بمشاهدة قطعة عائمة من الفلين عند مرور موجة بها. فقطعة الفلين ترتفع متائلة الى فوق وتحت دون تقدم يذكر. وعليه تسمى موجات البحار المفتوحة بموجات التذبذب.



شكل 13 - 2
حركة جزيئات الماء بمرور الأمواج.



شكل 13 - 3

التغيرات التي تحدث للموجة عند تحركها الى الشاطئ.

والى جانب التعرية عن طريق الاصطدام المباشر أو قوة الضغط تعمل الأمواج على كشط أى القطع والطحن، تحت تأثير الماء المزوج بقطع الصخور. وقد يكون الكشط أكثر فعالية في نطاق الأمواج المنكسرة منه في الأماكن الأخرى. وتذكرنا دائما الأحجار والحصى المستديرة على الشاطئ بتأثير طحن الصخور بعضها ببعض عند نطاق الأمواج المنكسرة، زد على ذلك أن الأمواج تستعملها كعامل للتعرية في الاتجاه الافقى (شكل 13 - 5).

ومعدل التعرية في الشواطئ المكونة من مواد متأسكة أعلى بكثير منه في الشواطئ الصخرية الصلدة. ففي مناطق من بريطانيا حيث الشواطئ تتكون من رسوبيات جليدية رملية وحصى وطين عملت التعرية على تهقير الشاطئ مسافة تتراوح بين 5.3 كيلومترات من موقعه إبان العهد الروماني مكتسحة الكثير من القرى والمواقع الأثرية الأخرى. وأجرف رأس كود هي مثال آخر على ذلك حيث أن معدل تراجع موقع الشاطئ قد بلغ مترا في السنة.

إنحراف الأمواج

تتقدم معظم الأمواج من الشاطئ في اتجاه عمودي. غير أنها عند وصولها الى المياه الضحلة حيث يكون القاع طفيف الانحدار يتغير اتجاهها الى موازاة الشاطئ. ويعرف هذا التغير في الاتجاه بانحراف الأمواج (شكل 13 - 6). وطرف الموجات القريب من الشاطئ يصل الى القاع أولا، وتقل سرعته بينما يستمر الطرف الثاني في تقدمه بنفس معدل

قنوات محصورة وضيقة قد تسبب في جرّ السابحين الى الأعماق عندما تكون قوية.

تعرية الأمواج

يصل فعل الأمواج حده الأدنى عند فترات الهدوء. وكما تقوم الأنهار بمعظم نشاطها أثناء الفيضانات فإن الأمواج تنشط كذلك أثناء العواصف البحرية. فقد تدفع كل موجة منكسرة بآلاف الأطنان من الماء على اليابسة. فمثلا يصل معدل ضغط موجات المحيط الأطلسي الى 10,000 كيلوجرام لكل متر مربع خلال فصل الشتاء. وتزيد هذه القوة أثناء العواصف. فقد نقلت الأمواج تجاه الشاطئ كتلة وزن 1350 طنا من الحديد والحرسانة بعد تمزيق كاسر للأمواج بخليج ويك باسكتلندا. وبعد خمس سنوات واجهت نفس المصير كتلة أخرى وزن 2600 طن كانت قد وضعت محل الأولى. وهناك أمثلة كثيرة على قدرة الأمواج المنكسرة على الشواطئ. فلا غرؤ أن نلاحظ التشققات والتصدعات التي سرعان ما تظهر بالأجرف والاسوار البحرية وكاسرات الأمواج وغيرها من التي تتعرض لهذه الصدمات الهائلة. فبدفع الماء الى كل فتحة تجعل الهواء بها تحت قوة ضغط كبيرة كافية لخلع الكتل الصخرية أو زيادة اتساع التشققات السابقة. والمنافذ الهوائية التي توجد ببعض الشواطئ ذات الأجرف مثال على قوة الأمواج الرهيبة (شكل 13 - 4). فأتثناء العواصف يندفع الماء والهواء خلال الفتحات المواجهة للبحر لتندفع فيما بعد على السطح في عمود مائي تصحبه أصوات تشابه أصوات الحماة المتفجرة.



شكل 13 - 4

تقذف الأمواج الى أجرف السواحل بالفتات الصخري ويتكون تجاوير اسفل الأجرف قد يتم تعرية بعض التجاوير لتتفتح بسقفها الى السطح مكونة ما يسمى بالمنافذ الهوائية. وعند ارتطام الأمواج بهذه الفجوات ذات المنافذ الهوائية يندفع الماء في عمود الى اعلى فيا يشبه الحماة.



شكل 13 - 5

قطع من تحت أحد الأجرف بفعل تعرية الأمواج بالمكسيك.

الخلجان المجاورة، فإنها تميل في محاذاته وتتقدم منه في اتجاه مواز له من ثلاثة اتجاهات. ومع مرور الوقت يعمل هذا على تسوية الشواطئ غير المستوية.

الجرف الشاطئي والتيارات الشاطئية

بالرغم من انحراف الأمواج فإن معظمها يصل الشواطئ في اتجاه قريب من العمودي. وبالتالي فإن الماء

سرعته. وتكون المحصلة في النهاية موجات موازية تقريبا للشاطئ بغض النظر عن اتجاهها الأصلي.

وبسبب عامل انحراف الأمواج فإن تأثيرها يكون أكثر تركيزا على المواقع البارزة من الشواطئ تجاه الماء وأقل منه بكثير في الخلجان. والشكل 13 - 8 يوضح التأثير المميز على مواقع الشواطئ غير المنتظمة. وحيث أن الأمواج تصل المياه الضحلة أولا، أمام ألسنة البحر أو الرؤوس البارزة قبل



شكل 13 - 6

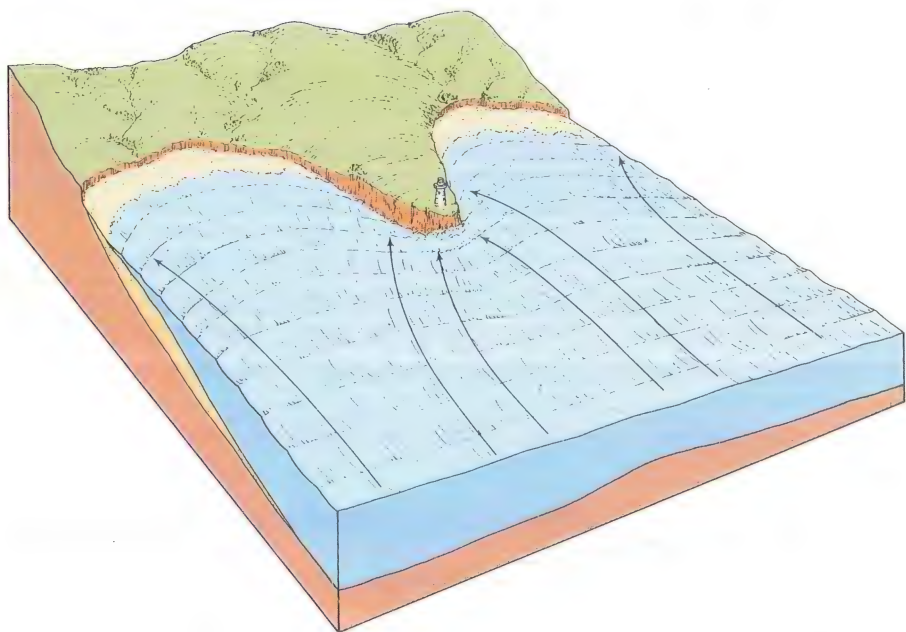
كان هذا البيت الصغير على الشاطئ في مأمن من خطر الأمواج غير انه بتراجع الشاطئ تم تعرض هذا البيت الى قوة الأمواج الضاربة.

وتعمل الموجات المائلة كذلك على احداث تيارات بنطاق الأمواج المنكسرة مواز للشاطئ. وحيث أن الماء مضطرب هنا فإن هذه التيارات الشاطئية يمكنها نقل حبيبات الرمل الدقيقة المعلقة بالاضافة الى درجة الحبيبات الاكبر حجما على القاع. وعند إضافة كمية الرسوبيات المنقولة بواسطة التيارات الشاطئية الى تلك

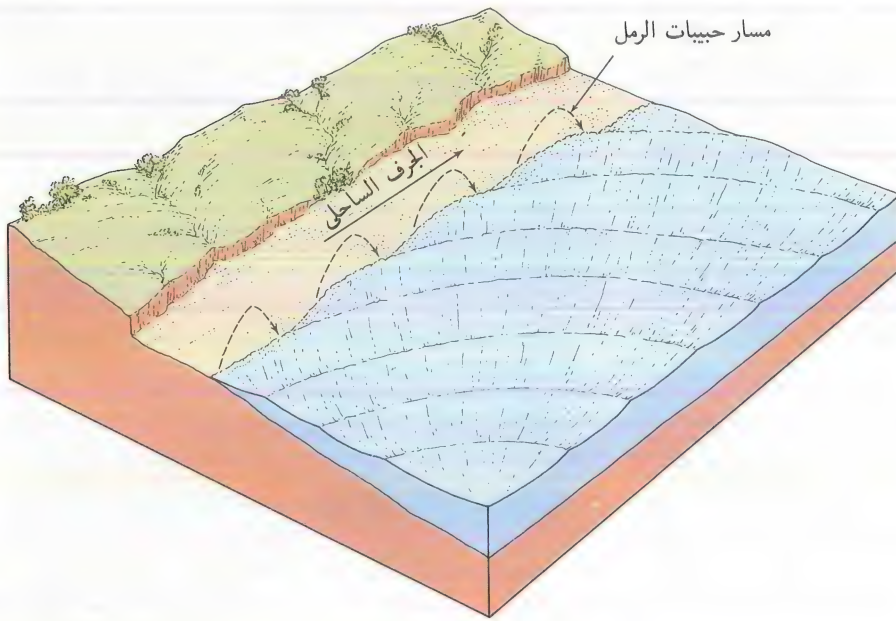
المندفع من كل موجة منكسرة يكون في اتجاه مائل. غير أن المياه في طريق عودتها الى البحر تأخذ اتجاهها مستقيما مع الانحدار. ويعمل هذا على نقل الرسوبيات في اتجاه متعرج على طول الساحل (شكل 13 - 9). وتعرف هذه الحركة بالجرف الشاطئي، وقد يعمل هذا على نقل حبيبات الرمل والحصى مئات وأحيانا آلاف الأمتار يوميا.



شكل 13 - 7
اتثناء الأمواج حول نهاية أحد الشواطئ.



شكل 13 - 8
إنكسار الأمواج على شاطئ غير منتظم.



شكل 13 - 9

الجرف الساحلي يسببه اندفاع
الماء من الأمواج المائلة.

بقائها بها وقد تنقل الى اماكن غير مرغوب فيها. وتعالج هذه المشاكل ببناء حواجز مائية وكاسرات أمواج. وقد تنتج بعض المشاكل عن تدخل الانسان نفسه في عمليات الطبيعة الساحلية ووقف حركة الرمال غير المرغوب فيها والتي قد تكلف الكثير لتصحيحها.

وتبنى الحواجز المائية في أزواج ممتدة في المحيط عند مداخل الأنهار والموانئ وذلك لحصر تيار الماء الناتج عن المد والجزر في قناة ضيقة تاركة الرمل في حركة دائمة بها لمنع من الترسيب داخلها. غير أن هذه الحواجز كما هو موضح بالشكل 13 - 10 قد تقف سدا أمام الرمال المتحركة بالجرف وتيارات السواحل مؤديا ذلك الى تراكمها عندها. كما تعمل الأمواج على ازالة الرمال عند الناحية المقابلة. وحيث أنها لا تستقبل أية رسوبيات رملية جديدة فسيختفي الشاطئ الرملى كلياً عند ذلك الموقع.

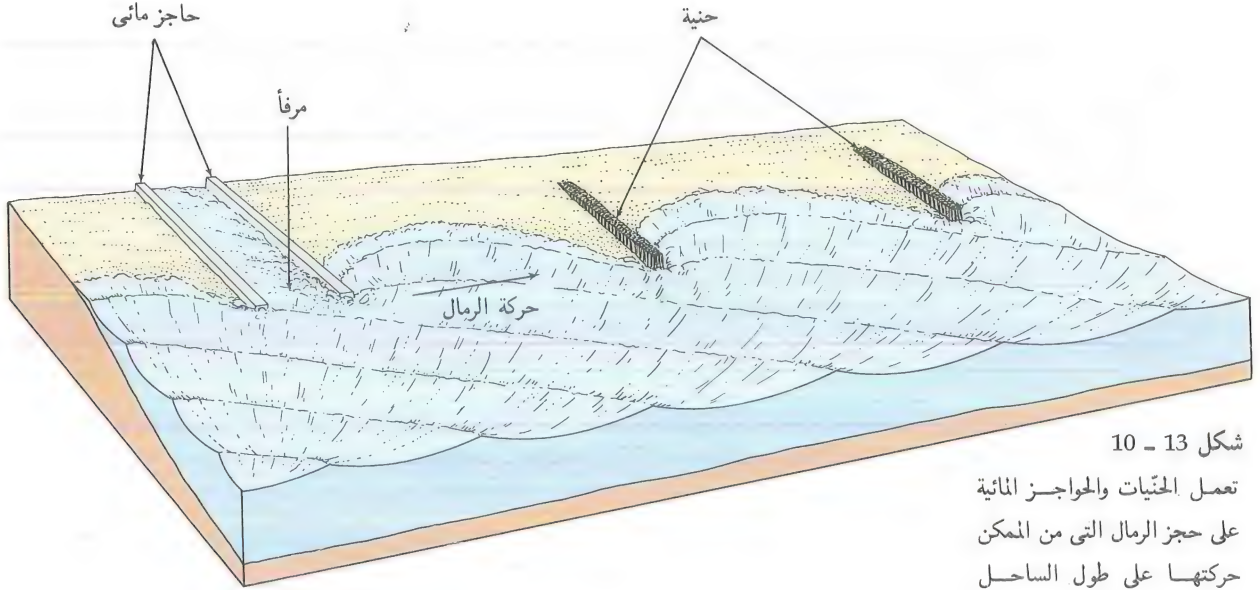
وللمحافظة أو لزيادة عرض الشواطئ التي تفقد رمالها بفعل الجرف أو تيارات السواحل يعتمد الى بناء الحنيئات وهي جدران قصيرة تبنى عمودياً على الساحل لحجز الرمال

المنقولة عن طريق الجرف نجد أنها لا يستهان بها. فقد وجد مثلاً في منطقة ساندى هوك بنيوجرسي أن الكمية المنقولة لمدة 48 سنة وصلت الى معدل يقارب 750,000 طن في السنة. وفي أوكسنارد بكاليفورنيا تنقل بهذه الطريقة أكثر من 1.5 مليون طن من الرسوبيات على طول الشاطئ سنوياً.

وقد لا يكون مصدراً للاستغراب تسمية الشواطئ بأنهار الرمال. ففي أى نقطة منها تزيد كمية الرسوبيات ذات المنشأ البعيد عن تلك المشتقة من المرتفع ورائها. ويلاحظ أن كثيراً من رسوبيات الشواطئ ليست مشتقة من تعرية الأمواج بل انها أتت بفعل الأنهار التي تصب في المحيطات والتي تعتبر مصدراً رئيسياً لها. وعليه لولا عامل نقل الرسوبيات بواسطة الجرف وتيارات الشواطئ لكانت كثير من الشواطئ تفتقر الى الرمال.

تدخل الانسان في العمليات المؤثرة في الشواطئ

تسبب حركة الرمال بواسطة الجرف وتيارات الشواطئ مشاكل عديدة. فالرمال قد تنقل من أماكن يرغب الانسان



شكل 13 - 10

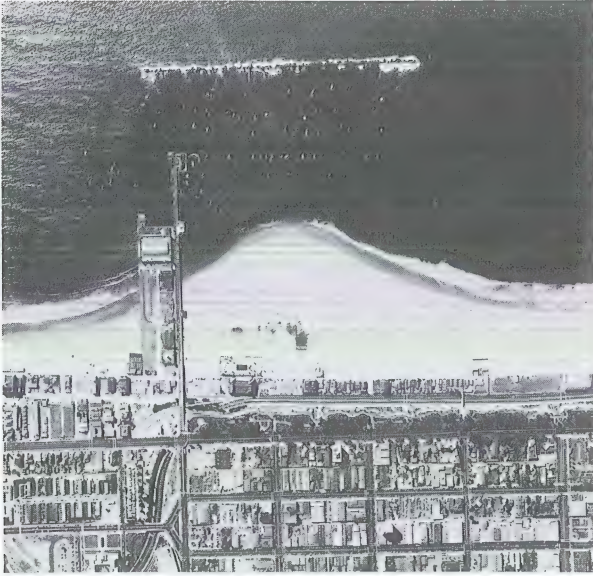
تعمل الحنّيات والحواجز المائية على حجز الرمال التي من الممكن حركتها على طول الساحل بواسطة الأمواج.

بأخرى ذات محتوى طيني أكبر مما زاد في قدرة الأمواج على تعرية الشاطئ الأقل مقاومة وبالتالي تعكر الماء ومن ثم قتل الشعب المرجانية القريبة. وقد سبب كذلك استبدال رمال شاطئ ميامي المكونة من حبيبات الكوارتز بأخرى كلسية التكوين في الحاق الضرر بمستعمرات الشعب المرجانية في المنطقة.

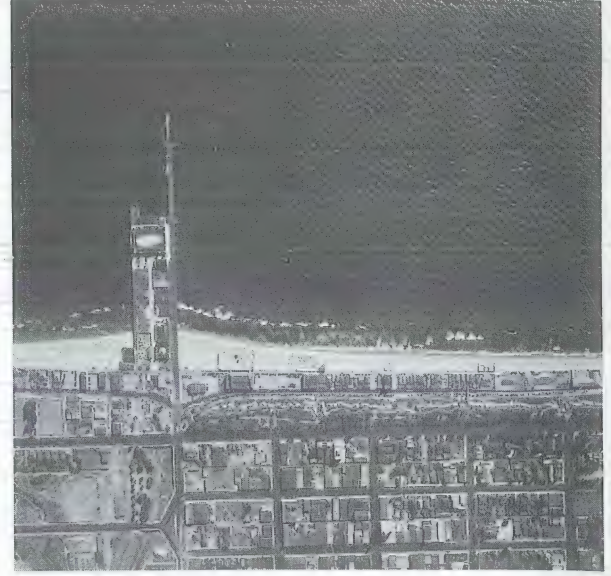
ولاستحداث مياه هادئة لحماية القوارب من الأمواج العاتية يقام حائل أمواج موازٍ للشاطئ. غير أن قلة نشاط الأمواج خلف الحاجز قد يترتب عليها بداية تراكم الرمال مما يؤدي إلى ملء المرفأ في تزامن مع تعرية الجزء الآخر من الشاطئ. فمثلا في سانتا مونيكا بكاليفورنيا حيث ظهرت هذه المشكلة بعد بناء حائل للأمواج فاضطرت سلطات المدينة إلى وضع آلة لرفع الرمال من داخل المياه المحمية ووضعها أمام الجرف وتيار الساحل لتصريفها (شكل 13 - 11).

وكما هو واضح من المثال السابق بأن عوامل الشاطئ الطبيعية تتفاعل مع أي تدخل للإنسان في مجراها، وكل إجراء لا يؤخذ في الاعتبار ما سيترب عليه في الجهة الأخرى

المتحركة (شكل 13 - 10). وحيث أن الحنّيات تؤدي عملها بفاعلية كبيرة فإن التيارات الساحلية ورائها والتي تفترق إلى حمولة رملية تعمل على نقل الرمال الموجودة هناك مما يثير احتجاج أصحابها. ولموازنة هذا الإجراء يقوم هؤلاء ببناء حنّيات على شواطئهم مما يضاعف من أعداد الحنّيات كما هو الحال عليه بشاطئ نيوجرسي، حيث تم بناء ما يقارب الثلاثمائة حنية. وحيث أن هذه الطريقة أثبتت عدم جدواها في تقديم حل مناسب طويل المدى لمشكلة التعرية بالشواطئ فقد تم استحداث طريقة أخرى تعرف بانعاش الشواطئ. وهي عبارة عن زيادة الرمال إلى الشواطئ من أن إلى آخر. وقد يكون مصدر الرمال قاع هور مجاور أو كئبان رملية على اليابسة. وقد ينقل الرمل مباشرة بواسطة الشاحنات إلى الشواطئ أو يصب في موقع ويترك أمر توزيعه إلى نشاط الأمواج. ويجب التنويه هنا إلى أن عملية الانعاش قد تكون حلا باهظ التكاليف ومثال ذلك تكلفة انعاش 24 كم من شاطئ ميامي بأمريكا والتي بلغت 64 مليون دولار. وبالإضافة إلى ذلك قد ينتج عن عملية الانعاش تأثيرات بيئية غير مرغوب فيها مثل ما حدث على شاطئ وايكيتي بهawaii حيث تم استبدال الرمال الكلسية



ب



أ

شكل 13 - 11

(أ) - شاطئ سانتا مونيكا سنة 1931 . (ب) - نفس الشاطئ سنة 1949 . عمل بناء حاجز الأمواج على الاخلال بنظام حركة الرمال ومن ثم تسبب في غزو الشاطئ تجاه الماء.

الأجزاء التى بقيت بارزة بعد نقل ما تستند اليه من رسوبيات. وهكذا يتراجع الجرف عن موقعه (شكل 13-5). وتتكون أرصفة قطع الأمواج بتراجع الأجراف التى هى نسبيا منبسطة فيما يشابه المنضدة (شكل 13 - 12). ويزداد الرصيف إتساعا كلما استمرت الأمواج فى تعريتها. وقد يبقى بعض الحطام الصخرى الناتج عن انكسار الأمواج على حافة الماء كجزء من معالم الشاطئ بينما ينقل الباقي الى داخل البحر.

وبسبب ظاهرة جرف الأمواج فإن الأجزاء البارزة تجاه البحر تتم مهاجمتها بعنف وتكون تعريتها مميزة، حيث يتم نقل الأقل صلابة والأكثر تشققا بمعدل أعلى من البقية. فقد تتكون نتيجة لذلك أولا كهوف بحرية. وعند التقاء إثنان من الكهوف البحرية يتكون ما يعرف بالقوس البحرى. وبعد تهاوى القوس تبقى بقاياها معزولة داخل الماء على أرصفة قطع الأمواج وتعرف بالكومة البحرية (شكل 13 - 13). وبالطبع يتم استهلاكها فيما بعد بالأمواج.

من الشاطئ قد تكون نتائجه غير مرضية. فالترسيب فى مكان ما يؤدي الى التعرية فى مكان آخر وبالتالى اعادة رسم شكل الشاطئ.

وفى بعض الأحيان قد تحدث تغيرات جذرية بالشاطئ اثر نشاط بشرى فى مناطق بعيدة عن ذلك المكان. فكما ذكرنا تعتبر الأنهار مصدراً رئيسياً لرمال الشواطىء. وتقوم الأمواج بنقل وتوزيع هذه الرسوبيات بواسطة الجرف والتيارات الساحلية. وفى حالة إقامة حاجز أو سد على النهر فإن الرسوبيات التى كان النهر يلتقى بها الى البحر ستترسب خلف السد. وحيث أن نشاط الأمواج مستمر على الشاطئ دون زيادة رمال فسينجم عن ذلك اختفاء رمال الشاطئ كلياً.

معالم الشواطىء

تتكون أجراف قطع الأمواج، كما تدل تسميتها، بقطع قاعدة اليابسة بفعل الأمواج المنكسرة. ومع تقدم التعرية تتهوى



شكل 13 - 12

ارتفاع ارضية قطع الأمواج بالقرب من سان فرانسيسكو. لاحظ تكون ارضية قطع الأمواج الجديدة عند القاعدة.

شكل 13 - 13

قوس بحري وكومة بحرية بالقرب من سانتا كروس بكاليفورنيا.

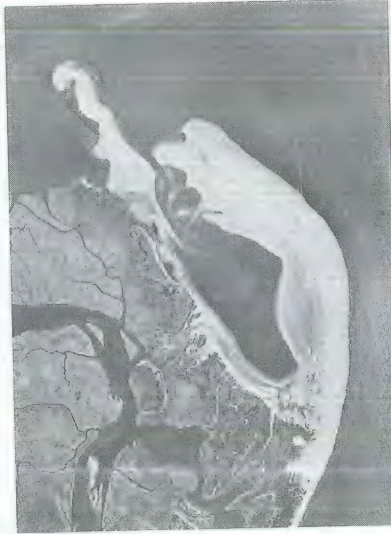


موازية للشاطئ (شكل 13 - 16). وعادة ما تكون المياه باهور بين هذه الجزر والشاطئ هادئة نسبيا، حيث تستعمل في ابحار المراكب الصغيرة بين نيويورك وفلوريدا لتفادي مياه شمال الأطلسي المضطربة.

ولا يعرف حتى الآن كيف تكونت جزر الحواجز هذه غير انه من المحتمل أن تكون قد تكونت بثلاث طرق أو أكثر. فبعضها قد يكون ألسنة رملية تم حجزها عن اليابسة بفعل تعرية الأمواج أو بارتفاع مستوى الماء بعد انتهاء آخر فترة جليدية. وقد يكون بعضها قد تكونت بواسطة اضطراب المياه وعمل الأمواج المنكسرة على تكديس الرمل بعد رفعه من قاع البحر. وحيث أن مستوى جزر الحواجز فوق مستوى سطح البحر فإن أغلب الظن أن يكون تكديس الرمال ناتج عن عصف الأمواج أثناء فترة المد. وأخيرا إقترحت بعض الدراسات بأن أصل جزر الحواجز كثنان رملية تكونت على

وفي مواقع جرف السواحل وتياراتها تتكون عدة ظواهر لها علاقة بحركة الرسوبيات على طول الشاطئ. فاللسان بروز رملي طويل الشكل يمتد من الأرض في اتجاه مدخل خليج مجاور (شكل 13 - 14). وغالبا ما يكون طرفه ملتويا تجاه اليابسة بفعل تأثير التيارات. وعقبة مداخل الخلجان تسمية للدلالة على حاجز رملي يسد بالكامل مدخل خليج عن البحر (شكل 13 - 15 أ). ويمتد هذا عندما تكون التيارات ضعيفة لتسمح بوصول اللسان الى الجهة المقابلة. أما التومبولو فهو سلسلة رملية تصل بين جزيرة واليابسة أو بين جزيرة وأخرى (شكل 13 - 15 ب). وهي تشابه عقبة مداخل الخلجان في طريقة تكوينها.

وسواحل خليج المكسيك الطفيفة الانحدار مع معظم الساحل الشرقي للولايات المتحدة جنوب مدينة نيويورك تتميز بما يسمى بجزر الحواجز. وهي روابي رملية داخل الماء



شكل 13 - 14

تبين هذه الصورة الجوية خطوات تكون لسان رملي بنيوجرسى على مدى أكثر من 23 سنة. (أ) - بداية تكون اللسان الرملي سنة 1940. (ب) - طول اللسان وصل 1600 متر وعرضه 400 متر سنة 1957. (ج) - وبحلول سنة 1963 نما اللسان المنحني 300 متر أخرى.



ب



أ

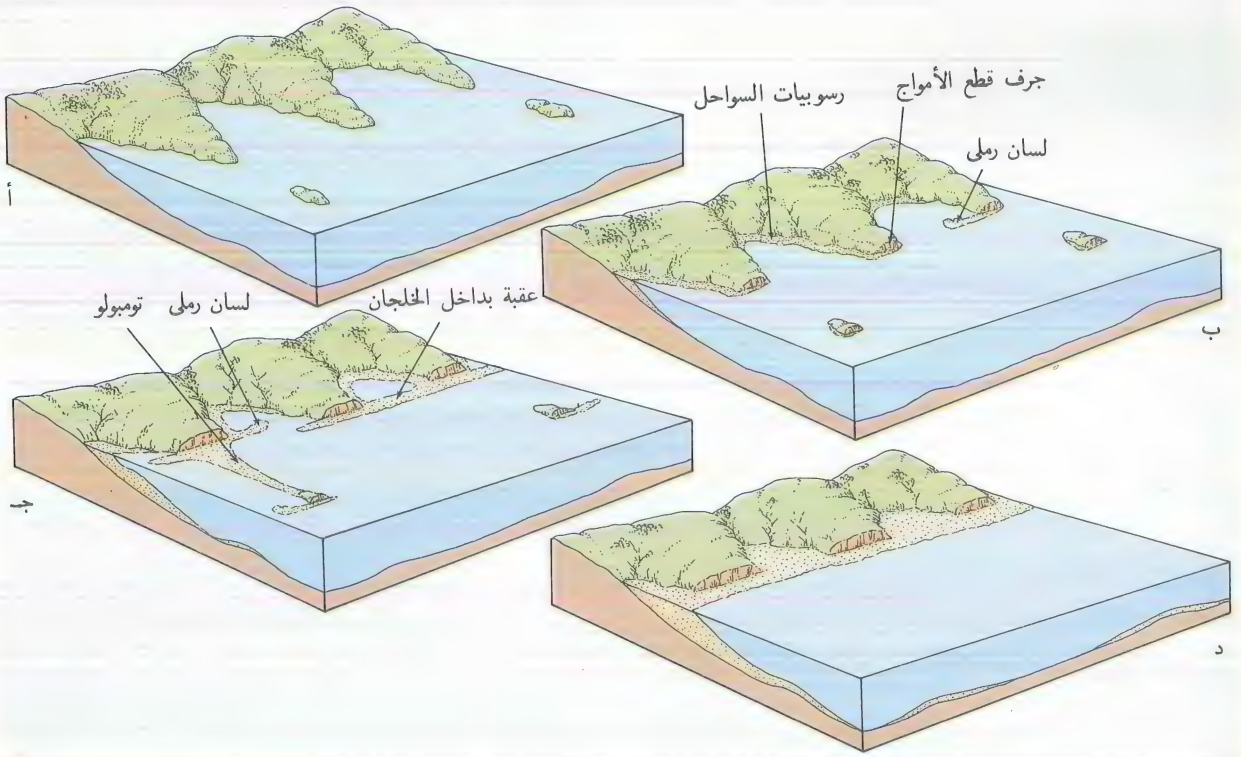
شكل 13 - 15

تكونت هذه الظواهر لحركة الرمال بواسطة الجرف الساحلى على طول الشاطئ. (أ) - عقبه مداخل
الخلجان. (ب) - تومبولو.

شكل 13 - 16

جزر الحواجز بشمال كاليفورنيا.





شكل 13 - 17

تطور نحو شاطئ غير منتظم في بدايته.

قطع أمواج تنقل الرسوبيات على طول الشاطئ. وبعض هذه الرسوبيات تتراكم كعقبات بداخل الخلجان أو ألسنة رملية. والبعض الآخر يتسرب بالخلجان إضافة إلى ما تجلبه الأنهار لينتج في النهاية شاطئ منتظم.

السواحل المنبثقة والمغمورة

بالنظر إلى اختلاف أشكال الشواطئ وكثرة أنواعها يمكننا أن نستنتج أنها أماكن معقدة جيولوجيا. ولتفهم طبيعتها يؤخذ بالحسبان الكثير من العوامل التي تشمل أنواع صخورها، وحجم واتجاه الأمواج، وتكرر العواصف، ومدى المد والجزر، وتضاريس الجزء المغمور تحت الماء والحركات التكتونية، إلى جانب تغير مستوى سطح البحر.

الشاطئ أثناء آخر عصر جليدي تم بعد انتهائه وذوبان الجليد وارتفاع مستوى سطح البحر غرقت المنطقة خلف سلسلة هذه الكثبان الرملية.

وما لا شك فيه أن الشاطئ يتغير بفض النظر عن شكله الأصلي. ففي البداية تكون الشواطئ عموما غير منتظمة. وتختلف شدة عدم إنتظامها من مكان إلى آخر. فالشواطئ ذو التكوينات الجيولوجية المختلفة قد تزيد الأمواج المنكسرة من عدم انتظامه حيث أن الأمواج ستعمل على تعرية الصخور الأقل مقاومة بسهولة مقارنة بالصخور الأكثر مقاومة. غير أنه متفق على أن الشواطئ الثابتة تصبح في نهاية المطاف أكثر إنتظاما بفعل التعرية والترسيب. ويوضح الشكل 13 - 17 تطور شاطئ غير منتظم البداية. وتعرية الأمواج للأجزاء البارزة مكونة أجرف وأرضيات



شكل 13 - 18

صورة من القمر الصناعي لجزء من الشاطئ الأمريكي الشرقي بين خليج شيسا بيك الذي تكون بانغار الشاطئ عند مصب النهر عند ارتفاع مستوى منسوب ماء البحر.

الشواطئ أو بانخفاض مستوى سطح البحر. أما السواحل المغمورة فان تكونها يكون اما بارتفاع مستوى سطح البحر أو بانخفاض المنطقة المجاورة للبحر.

ففي بعض الأماكن يكون واضحاً أن الساحل منبثق حيث أن ارتفاع اليابسة أو انخفاض مستوى سطح البحر سيبرز أجرف وأرصفة قطع الأمواج. ومنطقة سواحل

ولتعدد هذه المعطيات فان تقسيم الشواطئ ليس بالامر السهل.

وقد اعتمد الكثير من الجيولوجيين في تقسيم الشواطئ على تغيرها نسبة الى مستوى سطح البحر. وهذا التقسيم الشائع الاستعمال وغير المتكامل يجعل من الشواطئ نوعان مغمورة ومنبثقة. فالسواحل المنبثقة تتكون اما بارتفاع



شكل 13 - 18

صورة من القمر الصناعي لجزء من الشاطئ الأمريكي الشرقي بين خليج شيسا بيك الذي تكون بانقار الشاطئ عند مصب النهر عند ارتفاع مستوى منسوب ماء البحر.

ولتعدد هذه المعطيات فان تقسيم الشواطئ ليس بالامر السهل.

الشواطئ أو بانخفاض مستوى سطح البحر. أما السواحل المغمورة فان تكونها يكون اما بارتفاع مستوى سطح البحر أو بانخفاض المنطقة المجاورة للبحر.

ففي بعض الأماكن يكون واضحا أن الساحل منبتق حيث أن ارتفاع اليابسة أو انخفاض مستوى سطح البحر سيبرز أجرف وأرصفة قطع الأمواج. ومنطقة سواحل

وقد اعتمد الكثير من الجيولوجيين في تقسيم الشواطئ على تغيرها نسبة الى مستوى سطح البحر. وهذا التقسيم الشائع الاستعمال وغير المتكامل يجعل من الشواطئ نوعان مغمورة ومنبتقة. فالسواحل المنبتقة تتكون اما بارتفاع

المد والجزر

يعرف المد والجزر بتغير مستوى سطح البحر دوريا في منطقة ما. وقد عرف هذا الارتفاع والانخفاض على طول الشواطئ منذ القدم حيث أنها أسهل حركات البحر مشاهدة (شكل 13 - 19). ومع أنها قد عُرِفَ منذ قرون غير أنه لم يتم تفسيرهما العلمى حتى زمن إسحاق نيوتن الذى استعمل في ذلك قانون الجاذبية. فقد بين نيوتن أن المحيطات تقع بين قوى شد لجسمين. وحيث أن المياه بالمحيطات حرة الحركة فإنها تتشكل تبعا لذلك. إذن فالمد والجزرهما نتاج قوة جاذبية القمر والى حد ما الشمس المؤثرتين في الكرة الأرضية.

ولتوضيح كيف يتكون المد والجزر سنفترض أن الأرض كرة في حركة دوران مستمرة ومغطاة بعمق مائى واحد (شكل 13 - 20). وهنا يمكننا ببساطة أن نرى كيف يتكون البروز المائى على سطح هذه الكرة القريب من القمر. وبالإضافة الى ذلك يتكون بروز مائى مماثل على سطح الأرض المعاكس. واكتشف نيوتن أن كلا من البروزين يتكوّن نتيجة لقوة الجاذبية. وهى قوة تتناسب عكسيا مع مربع المسافة بين جسمين اللذين هما الأرض والقمر في هذه الحالة. وحيث أن الجاذبية تضعف بتزايد المسافة فإن تأثير جاذبية القمر يكون أقوى بقليل على جانب القمر الأقرب منه على الجانب المعاكس. وينتج عن هذا الانجذاب تمدد (استطالة) الأرض. وتحت تأثير هذه القوة نجد أن جسم الأرض الصلب لا يتأثر شكله كثيرا غير أن المحيطات القابلة للحركة نجد أنها تتشكل بصورة كبيرة مما ينتج عنه بروز مائى على جانبيها.

وحيث أن موقع القمر لا يتغير كثيرا بالنسبة الى الأرض في يوم واحد فإن بروزى الماء يبقيان في مكانهما بينما تتحرك الأرض من تحتها. وعليه فإن الأرض ستحمل المشاهد في أى موقع بالتناوب خلال مياه عميقة ثم مياه ضحلة وهكذا. وعند انتقال المشاهد الى مياه عميقة يتواجد في منطقة مد،

كاليفورنيا خير مثال على ذلك، حيث أن اليابسة قد ارتفعت نسبة الى مستوى سطح البحر في الدهر الجيولوجى الحديث. وتوضح أرصفة قطع الأمواج بالشكل 13 - 12 هذه الحالة. ومثلا شواطئ مرتفعات بالوس فيرديس جنوب لوس أنجلوس فتوجد بها سبع مستويات لدرجات تدل على ارتفاع اليابسة سبع مرات وقد يصبح الرصيف الجارى قطعه بواسطة الأمواج حاليا مدرجا آخر في حالة رفع اليابسة مرة أخرى.

وتشكل بعض الأمثلة الأخرى للشواطئ المنبثقة تلك التى كانت مدفونة تحت المجالد. وقد كانت القشرة الأرضية في هذه الأماكن منخفضة تحت وطأة وزن الجليد. وبعد ذوبانه أخذت ترتد تدريجيا مما ترتب عليه وجود معالم لشواطئ ما قبل التاريخ فوق مستوى سطح البحر بكثير. ومثال ذلك منطقة خليج هدسون بكندا، حيث أن أجزاء منه لا زالت ترتفع بمعدل سنتيمتر واحد كل سنة.

وعلى عكس الأمثلة السابقة تبين بعض الشواطئ الأخرى أدلة قاطعة على إنغمارها. ويلاحظ أن شاطئ الساحل المغمور خلال وقت ليس بالبعيد يتميز بتعاريجه، حيث أن البحر عادة ما يغمر الجزء الأخير من مجرى النهر مبقيا رؤوساً فوق مستوى سطحه تمثل المرتفعات التى كانت تفصل بين المجارى المائية بنهايته. وغالبا ما تسمى مصاب الأنهار المغمورة بالأخوار. وهى تميز الكثير من الشواطئ اليوم مثال خليجى شيزابيك ودلوير على الساحل الغربى الأمريكى (شكل 13 - 18). وكذلك مناظر شاطئ مين وخاصة بالقرب من حديقة أكاديا وهى مثال جيد لشاطئ تم غمره بالمياه مع ارتفاع مستوى سطح البحر عقب العصر الجليدى متحوّلا الى شاطئ مغمور ومتعرج.

ولبعض الشواطئ تاريخ جيولوجى معقد. فربما تكون قد غمرت وأنبثقت مرّات عديدة نسبة الى مستوى سطح البحر. وفي كل مرة تبقى فيها بعض من مميزات المرحلة السابقة.



شكل 13 - 19

(أ) - المد. (ب) - الجزر بخليج

فندى بنوفاسكوتيا كندا.

بالشكل (13 - 20 ب). ويبين هذا الشكل أن المشاهد في نصف الكرة الشمالى يمر بمد على الجانب المقابل للقمر يكون أعلى من المد الذى يحدث بعد نصف يوم. أما على نصف الكرة الجنوبي فإن المشاهد يمر بعكس ذلك تماما.

وتؤثر الشمس كذلك على المد والجزر ولكن لكونها بعيدة فإن تأثيرها يكون أقل من القمر. فجاذبية الشمس يترتب عليها تغير في مستوى سطح البحر بأقل من نصف ما

وعند ابتعاده عنها يتواجد في منطقة جزر. وبالتالي فان المشاهد سيمر في مدى يوم واحد بمدين وجزرين. وبالإضافة الى دوران الأرض فإن بروزى الماء يتحركان مع دوران القمر حول الأرض كل 28 يوما مما يسبب تأخر المد والجزر 50 دقيقة كل يوم. وبمرور يوم تكتمل الدورة لتبدأ دورة أخرى.

وقد لا يتساوى المد في يوم معين. فبناء على موقع القمر قد يميل البروز المائى تجاه خط الاستواء كما هو موضح

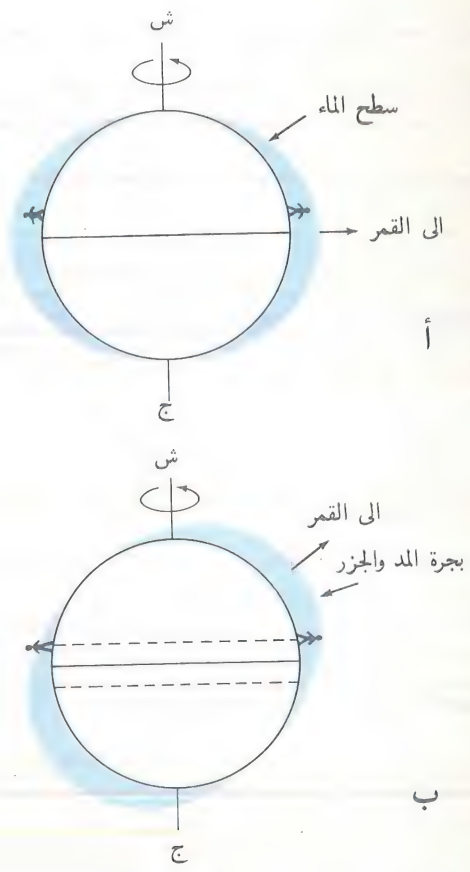
فإن مدى الفرق بين المد والجزر يكون عند حده الأدنى ويسميا عندها بالمد أو الجزر المحاقين.

وبالرغم من أن الشرح الى هذا الحد قد تناول الأشكال والأسباب الرئيسية لارتفاع مستوى سطح البحر وانخفاضه فإن هذه الاعتبارات النظرية لا يمكن استعمالها للتنبؤ بمقدار المد والجزر في مكان معين، حيث أن طبيعة شكل الشواطئ وأبعاد أحواض المحيطات تؤثر بدرجة كبيرة في ذلك. وبالتالي فإن المد والجزر يسلكان سلوكا مختلفا تجاه القوة وراء تكوينها وذلك باختلاف المكان. وبناء على ذلك فإن المشاهدة هي أدق الطرق لتعيين طبيعة المد والجزر في أى مكان. وجداول التنبؤ بالمد والجزر والمعلومات المتعلقة بها تعتمد على مثل هذه المشاهدات.

وتيارات المد والجزر مصطلح يستعمل للإشارة الى التدفق الأفقى للماء المتزامن مع ارتفاع وانخفاض مستوى سطح البحر. فعند المد يندفع الماء تجاه الشاطئ في فيض المد غامرا النطاق المنخفض من الشاطئ. وعند الجزر يندفع الماء في الاتجاه المعاكس فيما يعرف بانحسار الجزر كاشفا الجزء السفلى المغمور من الشاطئ.

وتعرف المساحة المتأثرة بتبادل هذين التيارين بمسطح المد والجزر. ويعتمد عرض سطح المد والجزر من مكان الى آخر حسب طبيعة الشاطئ. فقد تكون شريطا ضيقا وقد تكون مساحة كبيرة تغطي عدة كيلومترات مربعة.

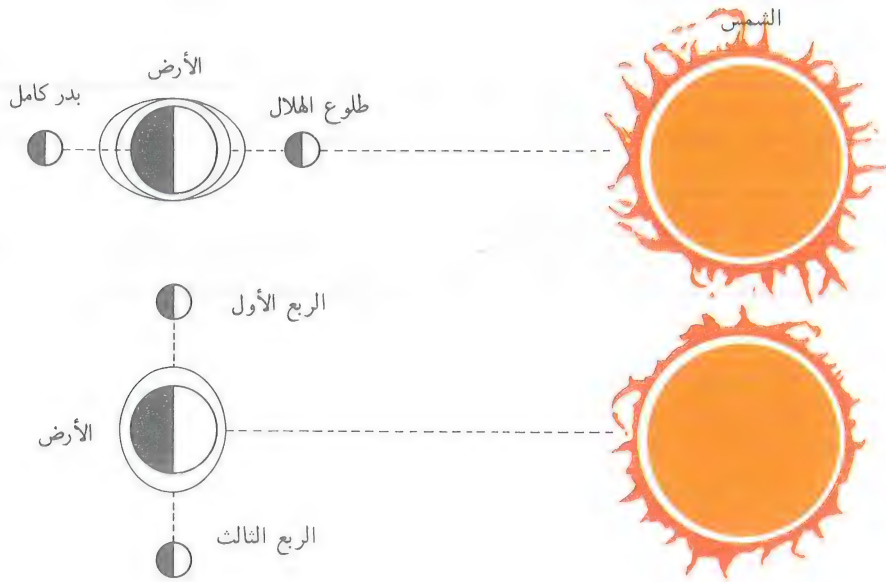
وقد لا تكون تيارات المد والجزر مهمة في البحر المفتوح ولكن حركتى المد والجزر قد ينتج عنها تيارات سريعة في الخلجان والمضائق وغيرها من الأماكن غير المتسعة. فعند شواطئ برتاني الفرنسية تصل سرعة حركة الماء في مد ذى ارتفاع حوالى 12 مترا. وتعتبر تيارات المد والجزر عامل تعرية ووسيلة نقل رسوبيات غير ذات أهمية كبيرة باستثناء مسلكها في الأماكن الضيقة. وهى في ذلك تقوم بتنظيف العديد من المداخل الضيقة لموانى جيدة قد تكون سدت في حال غيابها.



شكل 13 - 20

بروزى الماء بمحيط ذو عمق مائى واحد. (أ) - عند خط الاستواء.
(ب) - فوق مستوى خط الاستواء. عند الحالة الثانية يمر المشاهد بمدين وجزرين غير متساويين.

يترتب على جاذبية القمر. فقرب موعد بزوغ الهلال واستدارة البدر يكونان كلا من القمر والشمس على خط واحد مع الأرض مما يترب عليه اجتماع قوة جذبهما (شكل 13 - 21 أ). وعليه فإن المد الناتج يكون أعلى ويكون الجزر اكبر تأثيرا. ويسميان المد والجزر الربيعيين واللذان ينتج عنها أكبر مدى بين مد وجزر في اليوم الواحد. وعلى عكس ذلك عند الربع الأول والثالث من الشهر القمري، فإن قوة جاذبية القمر والشمس على الأرض تكون بزاوية قائمة وكل منهما يؤثر قليلا على قوة الآخر (شكل 13 - 21 ب). وعليه



شكل 13 - 21

علاقة القمر والشمس بالأرض. (أ) - المد والجزر الأعلى. (ب) - المد والجزر المحافى.

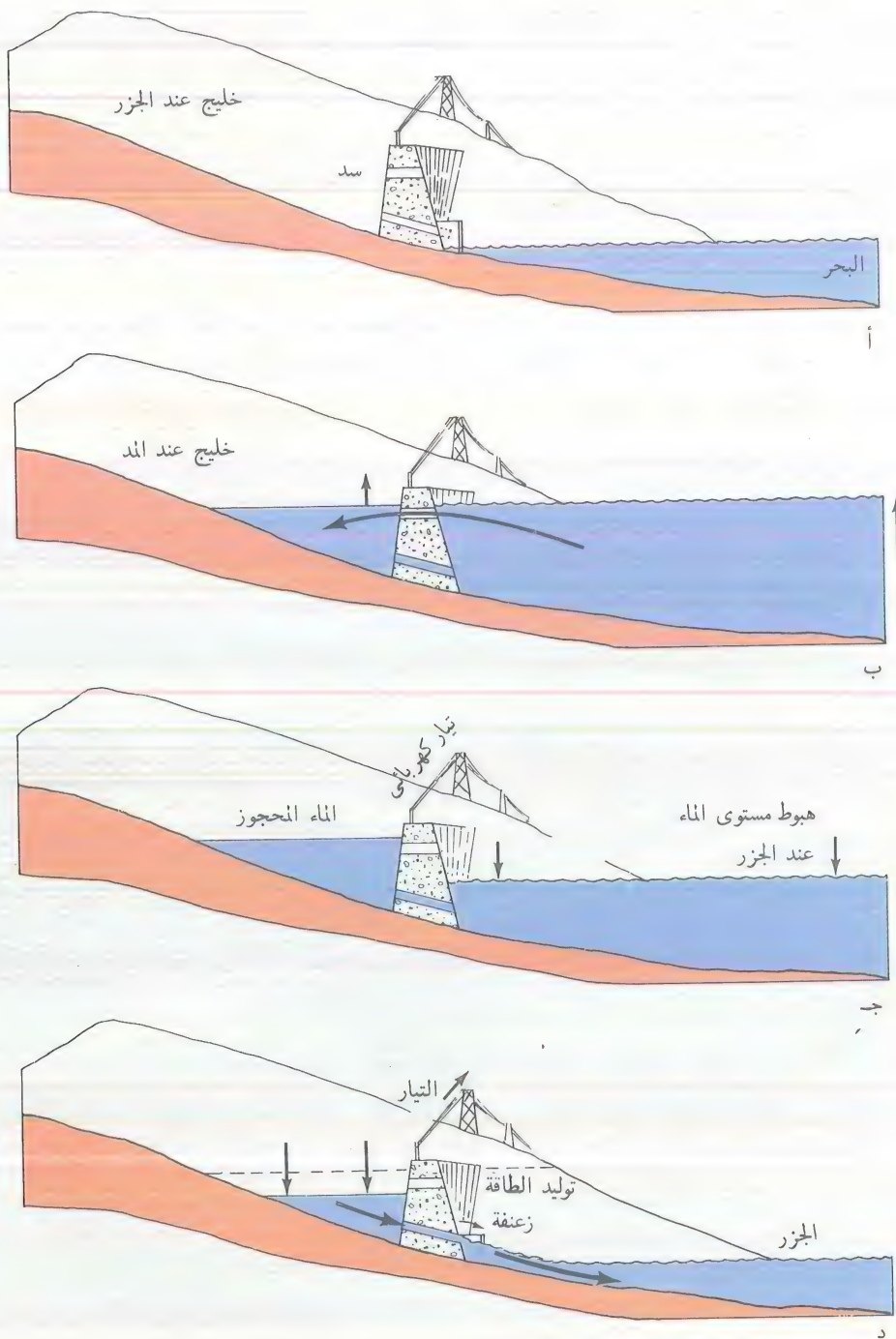
المد والجزر ودوران الأرض:

يقوم المد والجزر بإبطاء حركة دوران الأرض. غير أن معدل الإبطاء قليل جدا فقد تم تقدير هذه القيمة الضئيلة والثابتة بمدى يتراوح بين ثانية في اليوم في 120,000 سنة، وثانية في اليوم في 100,000 سنة. وبالرغم من ضآلة مقدارها غير أنها على مدى ملايين السنين من الآن قد تفقد الأرض تعاقب الليل والنهار، فإذا كانت الأرض تبطئ حركتها فإن الأيام كانت أقصر عبر الزمن الجيولوجي وعددها أكثر. وقد اتضح ذلك من دراسة الجيولوجيين للمستحاثات المرجانية والأصداف. فقد تم التعرف على عدد أيام السنة بعدد خطوط النمو اليومية في العينات الجيدة الحفظ (شكل 13 - 22). وقد بينت مثل هذه الدراسات بأنه قبل 350 مليون سنة كانت السنة تعد من 400 إلى 410 يوما، فيما كانت 390 يوما قبل 280 مليون سنة. وتتفق هذه الأرقام إلى حد بعيد مع معدل الإبطاء في دوران الأرض.



شكل 13 - 22

مستحاثات من المرجان عمرها 375 مليون سنة تمكن العلماء من معرفة عدد أيام السنة قديما بدراسة خطوط النمو على مثل هذه المستحاثات المرجانية.



شكل 13 - 23

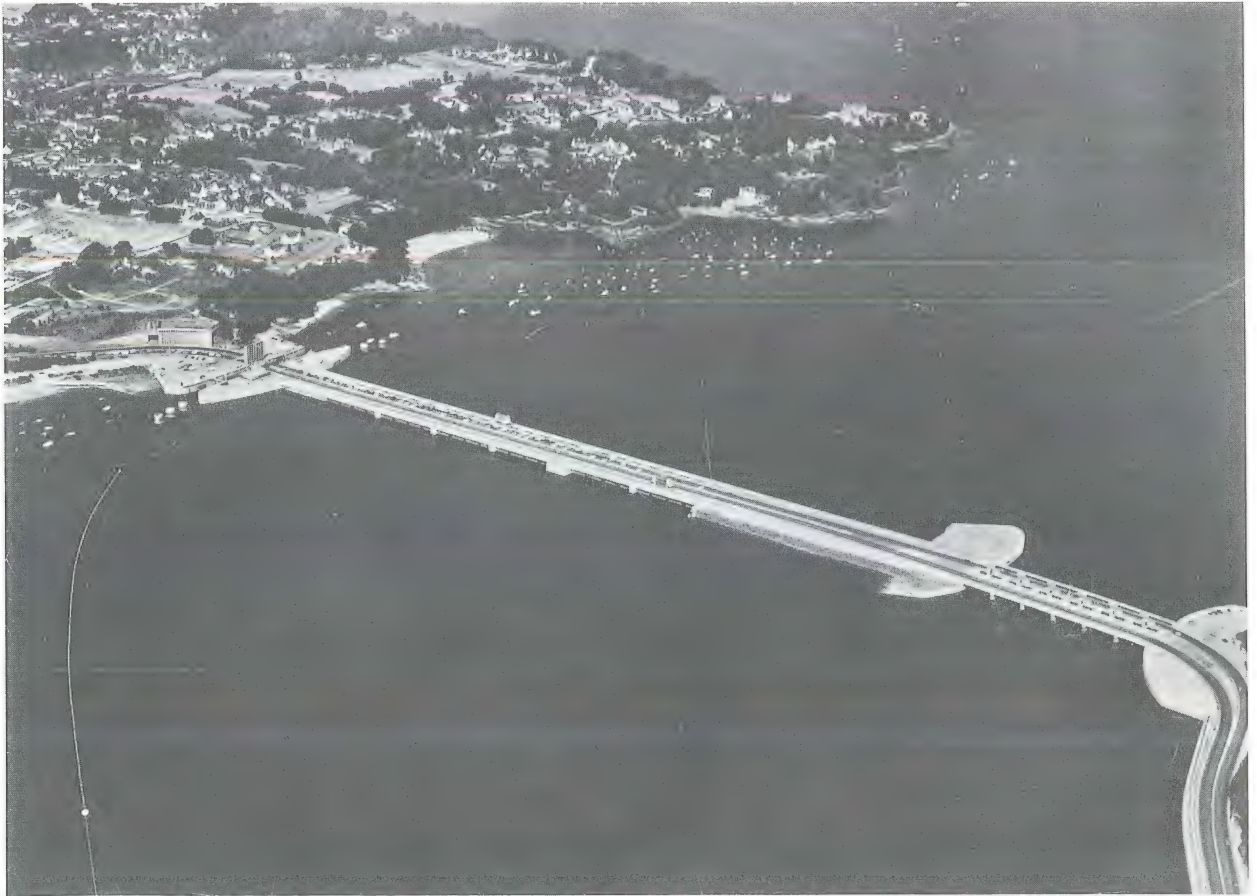
رسم مبسط يبين توليد الطاقة باستعمال ظاهرة المد والجزر بحجز الماء خلف سد.

المد والجزر وتوليد الطاقة

بزيادة تكاليف انتاج الطاقة ونضوب المخزون النفطى تم الاهتمام بإيجاد سبل أخرى لانتاجها. وبالرغم من إقتراح عدة طرق لتوليد الطاقة الكهربائية من المحيطات إلا أنه لم يحسن استغلالها الى الآن. ويعتبر المد والجزر لعدة قرون أهم مصادر الطاقة بالمحيطات. فمع بداية القرن الثانى عشر استغل الدولاب المائى الذى تحركه قوى المد والجزر فى ادارة طواحين الحنطة ومناشير الخشب. وقد كانت على سبيل المثال اكثر حاجيات مدينة بوسطن الأمريكية من الدقيق مصدره طواحين المد والجزر خلال القرنين السابع والثامن عشر.

ولزيادة الطلب فى يومنا هذا يلزم إيجاد سبل أكثر تقدما وتقنية لاستغلال القوى الناتجة عن الارتفاع والانخفاض الدائمين فى مستوى مياه المحيط ويمكن تسخير قوة المد والجزر ببناء سد عبر خليج أو مصب نهر بمنطقة ساحلية ذات مدى ملحوظ بين منسوبى مدها وجزرها (شكل 13 - 23). وتعمل هنا الفتحة الضيقة بين الخليج والمحيط على ابراز الفرق بين مستوى الماء عند المد وعند الجزر ويستفاد من اندفاع الماء عند دخوله الخليج وعند خروجه فى ادارة المولدات الكهربائية.

وخير مثال لتسخير قوة المد والجزر مشروع انتاج



شكل 13 - 24

أول محطة لانتاج الطاقة الكهربائية باستعمال ظاهرة المد والجزر على خليج مدخل نهر الرانس سنة 1966. يصل المد هنا الى 13.5 مترا وهو من اعلى مستويات المد فى العالم.

العالم المتزايدة، غير أنه يجب أن لا يتوقف السعى الى استغلال المد والجزر كمصدر للطاقة، وذلك كما أشار بول ريون بقوله:

بالرغم من أن هذا المصدر للطاقة يمثل نسبة ضئيلة من احتياجات العالم، غير أن إستغلالها سيعمل على إنقاذ كمية هائلة من المخزون الكائن بباطن الأرض حيث أن قدرة مشاريع الطاقة المنتجة بقوتى المد والجزر بالعالم مجتمعة قد قدرت بحوالى 635,000 ميجاوات، أى ما يعادل اكثر من بليون برميل من النفط فى السنة.

وبالاضافة الى ذلك فإن الطاقة الكهربائية المنتجة من هذا المصدر لا تستهلك أى وقود وبالتالي لا ينتج عنها مخلفات ضارة بالصحة كما أنها تعمل على إتلاف أقل قدر ممكن من المساحة المجاورة اذا ما قورنت بالسدود المنشأة على مصاب الأنهار.

الطاقة على نهر الرانس بفرنسا (شكل 13 - 24). وهو يعتبر أكبر المولدات المدارة بقوة المد والجزر وقد بدأ العمل سنة 1966 م حيث ينتج ما يسد حاجة إقليم بريتانى من الطاقة الكهربائية الى جانب مساهمته فى سد البعض من احتياجات عدة مناطق أخرى. ويوجد بالقرب من ممانسك بالاتحاد السوفياتى وتاليانج بالصين محطات تجريبية أصغر حجما لانتاج الطاقة الكهربائية. هذا ولم يستفد بعد من طاقة المد والجزر فى كثير من بلدان العالم بالرغم من وجود مواقع مثالية لاستغلالها مثال خليج باساماكودى بولاية مين الأمريكية حيث يبلغ الفرق بين منسوب المد والجزر 15 مترا.

وفى معظم الشواطىء يصعب الاستفادة من هذا المصدر للطاقة حيث يكون مدى الفرق بين المد والجزر أقل من 8 أمتار أو لغياب الخلجان الضيقة مما يجعل مثل هذا المشروع غير اقتصادى التكاليف. ولهذا السبب سوف لن يساهم هذا المصدر من الطاقة الكهربائية بنسبة كبيرة من حاجيات

أسئلة

للمراجعة :

- 1 - عدد ثلاثة معطيات تحدد ارتفاع وطول ودورة الموجه.
- 2 - صف حركة جزيئات الماء عند مرور الموجه (شكل 13-2) .
- 3 - اشرح ماذا يحدث عند انكسار الموجه .
- 4 - صف طريقتين للتعرية بواسطة الأمواج .
- 5 - ما هو انحراف الأمواج؟ وما هو تأثير هذه العملية على الشواطىء المتعرجة (أنظر شكل 10-5) .
- 6 - لماذا تسمى الشواطىء غالبا بأنهار الرمال؟
- 7 - لماذا تبنى الحنيّات؟ ولماذا يؤدى بناء حنيّة الى بناء أخريات؟
- 8 - صف تكون الأشكال التالية :
- أجرف قطع الأمواج، أرصفة قطع الأمواج، الكومة البحرية، اللسان الرملى، عقبة مداخل الخلجان، التومبولو.
- 9 - اذكر ثلاثة احتمالات لتكون جزر الحواجز.

- 10 - ما هي الأشياء التي يمكن أن تلاحظها حتى يمكنك وصف شاطئ بأنه منبثق؟
- 11 - هل توجد الأخوار مع الشواطئ المنبثقة أو المغمورة؟ لماذا؟
- 12 - اشرح حركة المد والجزر.
- 13 - علل لماذا يلاحظ المشاهد مدين وجزرين غير متساويين في اليوم الواحد (شكل 13-20).
- 14 - كيف تؤثر الشمس في حركتي المد والجزر؟
- 15 - ما المقصود بفيض المد وانحسار الجزر؟
- 16 - كيف أثرت حركة المد والجزر في دوران الأرض؟ وكيف جسد الجيولوجيون هذه النظرية؟
- 17 - ما هي مميزات الطاقة المستمدة من المد والجزر؟ وهل من المحتمل أن تساهم الطاقة الكهربائية المنتجة هنا في سد قدر كبير من حاجة العالم؟

الكلمات الدالة :

groin	حنية		
wave period	دورة الموجة		
submerged coast	ساحل مغمور	wave height	ارتفاع الموجة
emerged coast	ساحل منبثقة	wave-cut platform	أرضية قطع الأمواج
wave length	طول الموجة	surf	أمواج منكسرة
baymouth bar	عقبة مداخل الخلجان	ebb tide	انحسار الجزر
flood tide	فيض المد	refraction	إنحراف الموجة
sea arch	قوس بحري	fetch	الجهد
abrasion	كشط	tombolo	تومبولو
sea stack	كومة بحرية	tidal current	تيارات المد والجزر
spit	لسان رملي	longshore current	تيار شاطئ
tide	مد أو جزر	beach drift	جرف شاطئ
spring tide	مد أو جزر أعلى	wave-cut cliff	جرف قطع الأمواج
tidal flats	مسطح المد والجزر	barrier islands	جزر حواجز
wave of oscilation	موجة تذبذب	jetty	حاجز مائي
wave of translation	موجة انتقال	breakwater	حائل أمواج

14



الزلازل

14



ما هو الزلزال؟

علم الزلازل (علم الاهتزاز)

تحديد مصدر الزلازل

الأحزمة الزلزالية

أعماق الزلازل

شدة الزلازل ومقدارها

دمار الزلازل

- الدمار الذي تسببه الموجات الاهتزازية

- الموجات البحرية الاهتزازية (التسونامي)

- الحرائق

- الانهيارات الأرضية وهبوط سطح الأرض

التنبؤ بالزلازل وتجنب أخطارها

زلزال يقتل المئات

أوردت وكالات الأنباء الخبر التالي: اجتاح زلزال مدمر مدينة ماناجوا الواقعة بأمريكا الوسطى والتي يبلغ عدد سكانها 300,000 نسمة وذلك في صباح يوم أمس، تاركا وراءه خسائر كبيرة في الأرواح والممتلكات. وتشير التقديرات الرسمية بأن عدد القتلى قد وصل الى 18,000 نسمة، ولكن يبدو أن هذا الرقم مبالغ فيه.

(إن الحال هنا كمن يقف فوق الهلام) هذا ما نطق به فني الاتصالات الفضائية راي هاشبرجر من محطة تبعد ميلين عن المدينة.

وتشير التقارير المؤكدة أن عدد القتلى قد بلغ مائتان على الأقل وآلاف من الجرحى منهم من بقى

أثر فائق سان اندرياس في منطقة سهل كاريزو بجنوب كاليفورنيا.

بدون مأوى. ولقد كانت الجثث وحطام المباني متناثرة في الشوارع، ونشبت الحرائق في كثير من المباني. ويعتقد بأن عدد الموتى سيصل الى 2000 .

وكثير من نجوا من الموت يجلسون في مقاطع الطرقات مشدوهين، تحيط بهم الأشياء القليلة التي استطاعوا انقاذها من بين الأنقاض. وكثير آخرون قد فروا من المدينة.

لقد أصبح نصف القسم الواقع وسط المدينة آثارا بحلول الليل، اذ قضى الزلزال على 36 تجمعاً سكنياً في وسط المنطقة.

واشتعلت النيران دون توقف حتى المساء. فقد وقع الزلزال الذي يتراوح بين 6 و 7 على مقياس ريختر في الساعة 12:40 من صباح يوم أمس بعد عدة رجّات خفيفة.

وانقطعت كل الاتصالات العادية والمياه والكهرباء. وكانت بعض السفارات ضمن المباني المهدمة.

جاك برتون الذي كان في مدينة ليا - بيرو عندما هزها زلزال 31 مايو 1970 وصف زلزال ليا بأنه كان أكثر تدرّجاً رغم بلوغه نفس الشدة على مقياس ريختر. وأضاف معلّقاً أن هذا الزلزال جاء فجأة مثل قاطع الطريق. لقد أوقعنا على ركبنا ولم يكن لدينا أي تحذير على الإطلاق. وقد قال أحد الناجين «لقد انتابنا شعور بنهاية العالم».

الآلاف يملؤن الشوارع مشدوهين وآلاف آخرون هربوا الى الريف بينما ارتفعت أعمدة الدخان من الانقاض.

وحتى ليلة البارحة قيل إن النيران قد تم إخمادها مع استمرار الهزات الخفيفة خلال النهار حتى المساء متسببة في انفصال الحطام من المباني التي تهدمت.



شكل 14 - 1

تقع هذه المباني المتكئة فوق تربة غير متماسكة كانت تشبه الرمال المتحركة خلال زلزال 1964 في نيجاتا اليابانية وبالرغم من أن معظم المباني لم تتصدع إلا أن وضعها الجديد غير مرغوب فيه.



شكل 14 - 2

مدينة سان فرانسيسكو وهي تشتعل بعد زلزال 1906 .

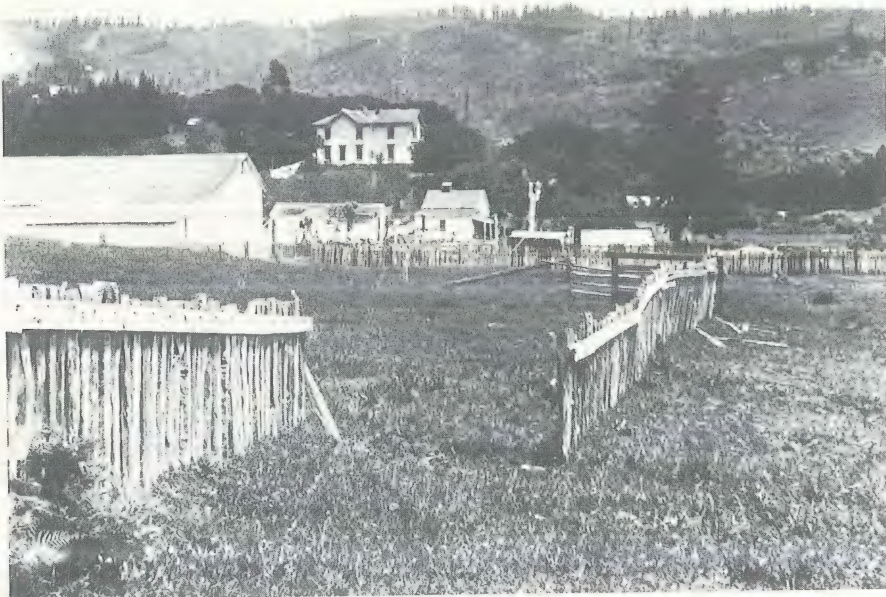
الأصلي أو البؤرة في شكل موجات مشابهة تماما لتلك التي يحدثها جرس عند دقة مسببا اهتزاز الهواء المحيط به. وأثناء حدوث زلزال، ولعدة ساعات بعد حدوثه، يمكن تشبيه الأرض بالجرس أثناء رنينه رغم أن الطاقة تشتتت بسرعة كلما بعدت المسافة من البؤرة. كما أن جميع أجهزة رصد الزلازل في العالم تسجل هذه الواقعة.

فالطاقة الهائلة التي يطلقها الانفجار الذري أو الفوران البركاني قد تنتج زلزالا ولكن هذه الكوارث تعتبر ضعيفة وغير دائمة. ولكن ما هي القوة المسببة للزلازل المدمرة؟ توجد أدلة كثيرة توضح أن الأرض ليست كوكبا ساكنا. إذ يمكن مشاهدة عدة مصاطب قديمة خلفتها الأمواج تعلو أقصى ارتفاع للمد بعدة أمتار. وتشير إلى رفع القشرة الأرضية بمقدار مساوٍ بينا توجد مناطق أخرى بها أدلة على إنخفاض ملحوظ في سطح الأرض. وبالإضافة إلى هذا الانزلاق الرأسى، يشير التفاوت في خطوط الأسوار والطرق والهياكل الاصطناعية، إلى شيوع الحركات الأفقية (شكل 14 - 3). وهذه الحركات غالبا ما تصاحبها شقوق كبيرة في سطح الأرض والتي تعرف بالفوالق أو الصدوع. ويمكن تفسير

هذا ليس هو الزلزال الأول من نوعه الذى يهز مدينة ماناجوا وقد لا يكون الأخير. ويحدث حول العالم ما يقارب مليون زلزال كل سنة. ولحسن الحظ فإن قليلا منها له تأثير مدمر كالذى حدث في مدينة ماناجوا سنة 1972، والذى قد تم وصفه آنفا. وفى الغالب لا يحدث إلا عدد قليل جدا من الزلازل المدمرة كل سنة. وعند حدوثها فإنه يحق وصفها بأعنى القوى الطبيعية المدمرة على وجه الأرض. إن اهتزاز الأرض المصحوب بارتجاج التربة يسبب الحراب والدمار للمباني (شكل 14 - 1). هذا بالإضافة إلى أن خطوط التيار الكهربائى والغاز غالبا ما تتحطم فى المناطق الآهلة بالسكان مسببة عدداً من الحرائق. ففي زلزال مدينة سان فرانسيسكو عام 1906، كان سبب معظم الدمار هو الحرائق التى لم يكن من الممكن التحكم فيها. فقد تركت خطوط المياه المحطمة رجال المطافئ دون ماء كاف للاطفاء (شكل 14 - 2).

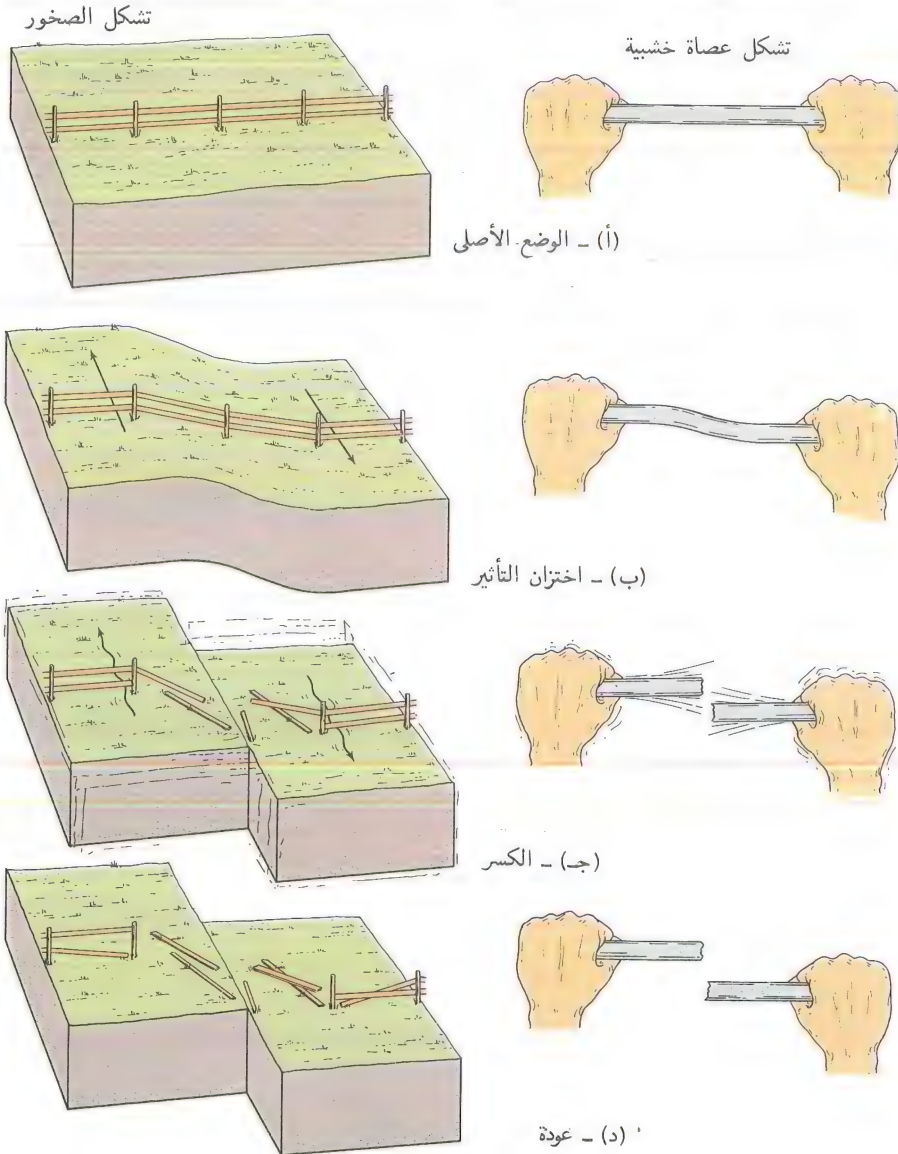
ما هو الزلزال؟

الزلزال هو اهتزاز الأرض الناشئ عن التحرر السريع للطاقة. وتنطلق هذه الطاقة فى جميع الاتجاهات من مصدرها



شكل 14 - 3

لقد ازيع هذا السياج متران ونصف المتر خلال زلزال 1906 بسان فرانسيسكو.



شكل 14 - 4

الارتداد المطاطي - عندما تطوى الصخور فانها تتقوس، وتخزن الطاقة المطاطية، فعندما تتأثر الصخور فوق نقطة انكسارها فانها تتحطم محررة الطاقة المختزنة على هيئة موجات زلزالية.

وقد حيرت الميكانيكية الحقيقية لحدوث الزلازل جميع الجيولوجيين إلى أن قام هـ. ف. ريد بدراسة لاحقة لزلازل 1906 بسان فرانسيسكو. وقد صاحب الزلازل ظهور ازاحات أفقية لعدة أمتار على امتداد الجزء الشمالى لفالق سان أندرياس. وهو شق فى الأرض طوله 950 كيلومترا ويتخذ اتجاه الشمال فى جنوب ولاية كاليفورنيا. ويفصل هذا

معظم الحركات على امتداد الصدوع تفسيراً مرضياً باستعمال نظرية حركية الألواح.

ويفترض نموذج حركية الألواح أن كتلا كبيرة من الأرض هى فى حركة دائبة. وتتأثر الألواح المتحركة بالألواح المجاورة لها متسببة فى تأثرها وإعادة تشكيلها عند الحواف. وتحدث معظم الزلازل على امتداد أطراف الألواح.

هذا بالإضافة الى أن عددا من الهزات الخفيفة المسماة بالرجات الأمامية غالبا ما تسبق الزلزال الرئيسى بعدة أيام أو بعدة سنوات في بعض الأحيان. وقد استفيد من رصد هذه الرجات الأمامية في التنبؤ بالزلازل القوية القادمة. وسوف نستعرض موضوع التنبؤ بالزلازل في جزء آخر من هذا الفصل.

أن القوى الحركية التى أدت الى التوتر والذى تم انطلاقه خلال زلزال 1906 بسان فرانسيسكو، لا تزال نشطة. وتستعمل أشعة اللايزر في الوقت الحاضر لتحديد الحركة النسبية بين الجانبين المتقابلين على هذا الفالق. وقد أظهرت هذه القياسات ازاحة مقدارها سنتيمترين في السنة. ورغم أن معدل هذه الحركة يبدو بطيئا فهو يعتبر في الحقيقة كبيرا بقياس الزمن الجيولوجي. اذ خلال 30 مليون سنة يكفى هذا المعدل لانزلاق الجزء الغربى من ولاية كاليفورنيا الى الشمال بحيث تصبح مدينة لوس أنجلوس التى تقع على لوح المحيط الهادى المتحرك في اتجاه الشمال، بمحاذاة مدينة سان فرانسيسكو التى تقع على لوح أمريكا الشمالية. وعندما يصل التوتر مرة أخرى المستوى اللازم فإنه يمكن توقع انزلاق مصحوب بزلزال.

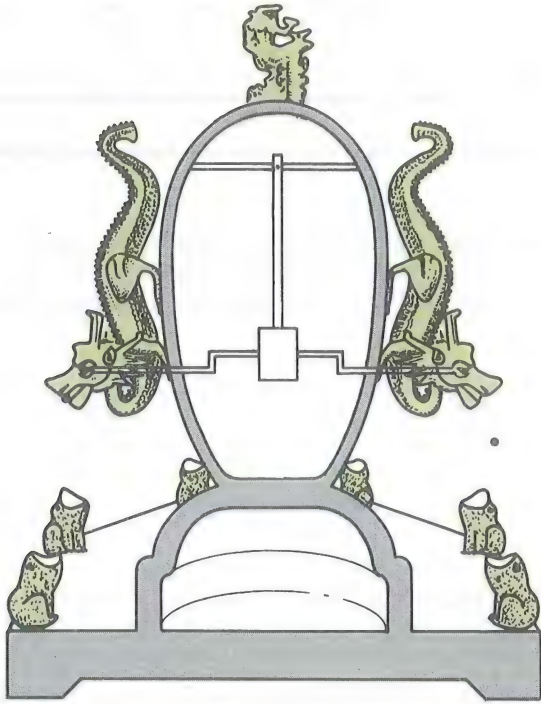
ومن المقدّر أن تقع زلازل كل 50 الى 200 سنة على امتداد أطراف الألواح المائلة لفاق سان أندرياس. وقد وصفت هذه الحركة المتكررة بأنها تمثل حركة الانزلاق الرجفى حيث أن الطاقة المرنة قد تم اختزانها لفترة من الزمن ثم انطلاقها بعد ذلك عن طريق الانزلاق.

ليس كل حركة على امتداد فائق سان أندرياس هي من هذا النوع الرجفى. إذ تمثل هذه الحركة زحفا بطيئا على امتداد أجزاء معينة من هذا الفالق. ولهذا، فبينما تزحف بعض أجزاء الفالق باستمرار، يتجمع التوتر ببعض الأجزاء الأخرى المقفلة مما يؤدي الى وقوع زلازل قوى. وإضافة الى ذلك، فليس كل الحركات على امتداد الصدوع هي حركات أفقية كما يحدث على امتداد فائق سان أندرياس. إذاً تعتبر

الصدع الكبير بين مناطق من سطح الأرض تعرف بلوح الشمال الأمريكى ولوح المحيط الهادى. وتشير الأدلة الحقلية الى انزلاق لوح المحيط الهادى أثناء هذا الزلزال مسافة 6 أمتار في اتجاه الشمال بمحاذاة لوح الشمال الأمريكى.

وباستعمال قياسات مساحية عديدة تفصل بينها عدة سنوات اكتشف ريد أنه خلال الخمسين سنة التى سبقت زلزال سنة 1906، فقد أظهر سطح الأرض عند النقاط البعيدة على جانبى الفالق ازاحة نسبية تزيد قليلا عن ثلاثة أمتار. ويوضح الشكل 14 - 4 الميكانيكية التى استنبطها ريد لحدوث الزلازل. وتعمل القوى الحركية على تشكّل صخور القشرة الأرضية ببطء شديد على جانبى الفالق كما يتضح من انحناء الانشاءات. وتنحن الصخور تحت هذه الظروف، وتخزن طاقة مرنة مثل ما يحدث لعمود من الخشب عند ثنيه. وفي النهاية يتم التغلب على القوى التى تشد الصخور مع بعضها. وعندما يحدث الانزلاق في أضعف المناطق وهى البؤرة، تحدث الازاحة الناشئة تأثيرا على امتداد الصدع حيث يقع انزلاق إضافي حتى يتم تحرر كل الأثر المخزن فيسمح الانزلاق بعودة الصخور المشكّلة الى وضعها الأصلي. وعندما تعود الصخور الى وضعها الأصلي لكونها مرنة فإنها تسبب في حدوث الزلزال. وقد أطلق ريد على ظاهرة ارتداد الصخور الى موضعها الأصلي عبارة الارتداد المرن حيث أن الصخور تتصرف بمرونة مثلما يحدث عند ارتخاء (حلقة من المطاط) بعد شدّها.

لقد استمرت الهزات الشديدة لزلزال 1906 بسان فرانسيسكو حوالى 40 ثانية. ورغم أن معظم الازاحات على امتداد الفالق قد حدثت خلال هذه البرهة القصيرة إلا أن حركات اضافية وتعديلات في الصخور قد استمرت لعدة أيام بعد وقوع الزلزال الرئيسى. وتسبب التعديلات التى تحدث عقب وقوع زلزال كبير عادة، في عدة زلازل خفيفة تسمى بالرجات التلوية. ورغم أن هذه الرججات التلوية هي أضعف بكثير من الزلزال الرئيسى، إلا أنها تسبب دمارا كبيرا في بعض الأحيان للمنشآت التى تأثرت بالاهتزاز من قبل.



شكل 14 - 6

مرجفة صينية عتيقة. خلال الهزات الأرضية تسقط الكرات المعدنية من أفواه التينينات الواقعة في الاتجاه الرأسى للحركة، فتتلففها أفواه الضفادع التى تحتها.

من أفواه التينينات الى أفواه تماثيل الضفادع المنتظرة تحتها. وقد يكون الصينيون على علم بأن الحركة القوية الأولى للزلازل لها اتجاه. وعندما تكون الحركة بدرجة قوية فان كل الأشياء غير المثبتة سوف تنهار فى نفس الاتجاه. ويبدو أن الصينيين استعملوا هذه الحقيقة للكشف على اتجاه مصدر الزلازل. ولكن الحركة المعقدة للموجات الزلزالية تجعل من المستبعد فى أغلب الأحيان أن يتم تحديد الاتجاه الحقيقى للزلازل.

ومن حيث المبدأ على الأقل فان المرجفة الحديثة (مرسمة الزلازل)، وهى جهاز تسجيل الموجات الزلزالية، تشبه الجهاز الذى استعمله الصينيون القدماء. فالمرجفة كتلة معلقة من



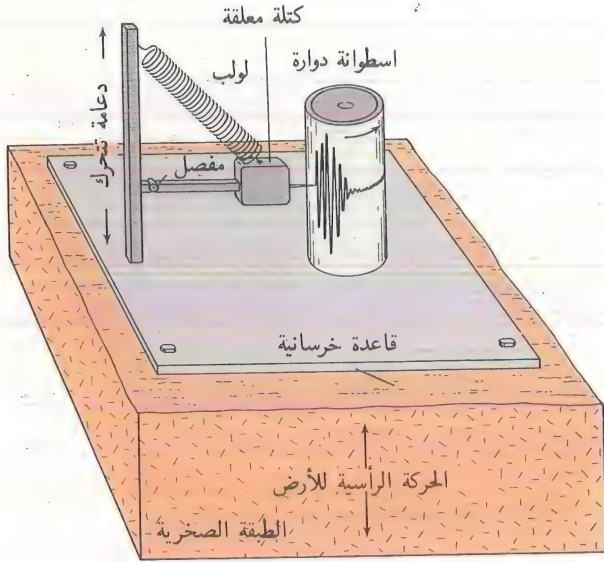
شكل 14 - 5

واجهة صخرية ناتجة عن الإزاحة الرأسية على امتداد صدع خلال زلزال 1964 بالاسكا.

الإزاحة الرأسية على امتداد الصدوع شائعة جداً، حيث يرتفع أحد الجوانب الى أعلى بالنسبة للجانب الآخر. ويوضح شكل (14 - 5) واجهة أحدثتها مثل هذه الإزاحة الرأسية. وبنفس الطريقة فان زلزال قودفرايداي (الجمعة المباركة) بالاسكا سنة 1964، قد أحدث إزاحة رأسية مقدارها 15 متراً فى أحد المواقع. كما تحدث عدة زلازل على أعماق كبيرة بحيث لا تظهر إزاحاتها على سطح الأرض.

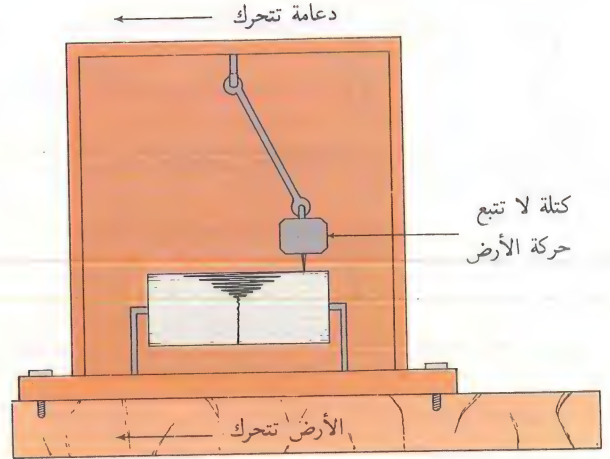
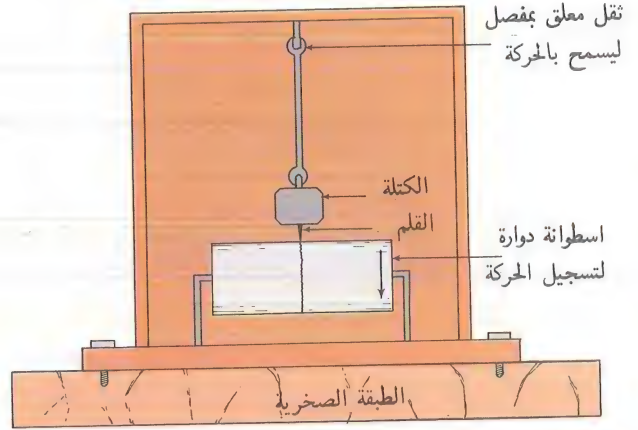
علم الزلازل (علم الاهتزاز)

ترجع دراسة علم الزلازل (الموجات الاهتزازية) الى محاولات قام بها الصينيون منذ حوالى 2000 سنة لتحديد المصدر الذى تنشأ عنه موجات الزلازل. وجهاز قياس الاهتزاز الذى استعمله الصينيون هو عبارة عن جرة كبيرة مجوفة تحتوى على كتلة معلقة من أعلى (شكل 14 - 6). وهذه الكتلة المعلقة، التى تشبه ساعة البندول، متصلة بطريقة ما بفكوك عدد من التماثيل التى على هيئة تينينات تحيط بالجرة ويوجد بين فككى كل تينين كرة معينة. وعندما تصل الموجات الزلزالية الى الجهاز فان الحركة النسبية بين الكتلة المعلقة والجرة قد تسمح بسقوط بعض الكرات المعدنية



شكل 14 - 8

مرجفة مصممة لتسجيل الحركة الرأسية للأرض.

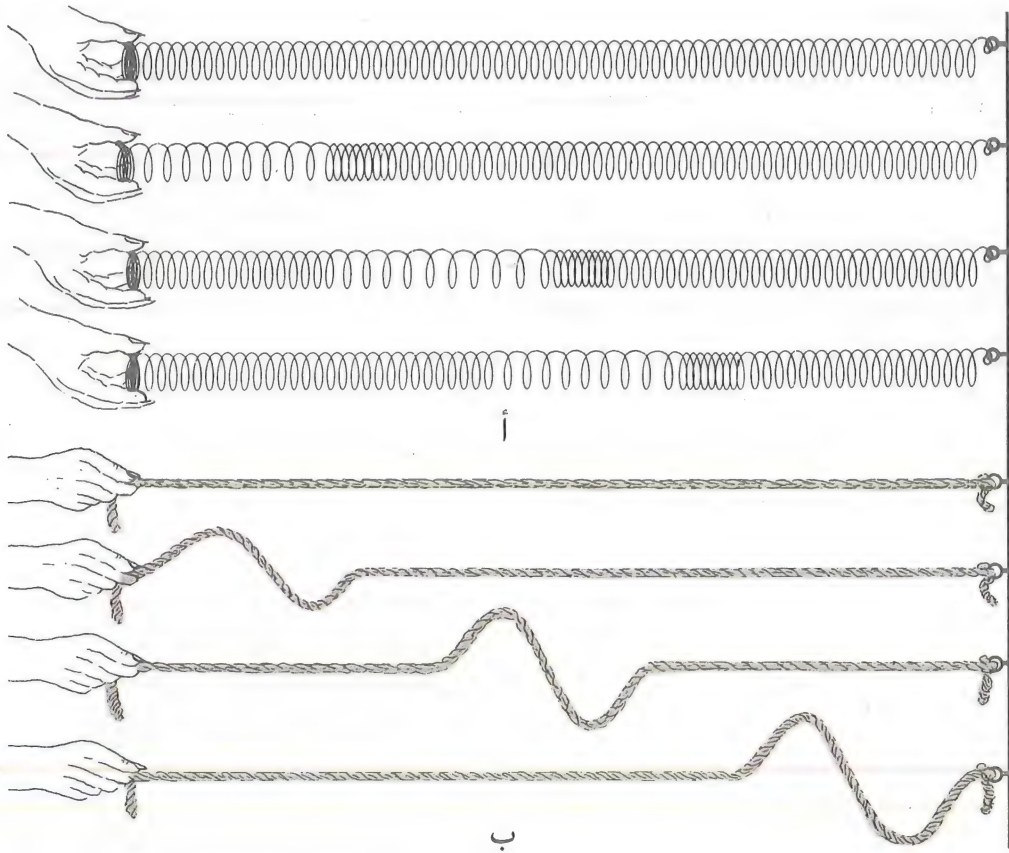


شكل 14 - 7

مبدأ عمل المرجفة - تعمل قوة القصور الذاتي للكتلة المعلقة على بقائها ساكنة بينما تهتز اسطوانة التسجيل المثبتة الى الصخور تحتها استجابة للموجات الاهتزازية. وبذلك تعمل الكتلة الثابتة عمل المرجح الذي يمكن بواسطته قياس مقدار الازاحة الناتجة عندما تمر الموجات الزلزالية بالصخور تحتها.

ويمكن توضيح المبدأ الذي تقوم عليه المرجفة بربط كتلة ثقيلة في خيط والامساك بالنهاية الأخرى للخيط بحيث يكون الثقل معلقا قريبا من الأرض. وتمثل الحركة السريعة للخيط من جانب الى جانب، الاهتزازات التي يحدثها الزلزال. لاحظ أن الكتلة تبقى ساكنة. وأى حركة تلاحظها سوف تكون بسيطة، وهي تمثل التآرجح الطبيعي للبندول (ذلك يشبه تآرجح بندول الساعة). هذا كما تزود المرجفات الحديثة لقياس الزلازل بوسيلة خاصة لتضائل الموجات وذلك لازالة أثر التآرجح للكتلة المعلقة.

وتد مثبت في الأرض (شكل 14 - 7). وعندما تصل الاهتزازات الناتجة عن زلزال بعيد عن جهاز التسجيل فان القصور الذاتي للكتلة تبقىها ساكنة نسبيا بينما تتحرك الأرض مع الوند. ويتم تسجيل حركة الأرض بالنسبة للكتلة الساكنة على قرص دوار أو على شريط مغنط.



شكل 14 - 9

أنواع الموجات العميقة وحركاتها المميزة. (أ) - الموجات الأولية (و) تعمل على اهتزاز جزيئات المادة إلى الأمام وإلى الخلف في نفس الاتجاه الذي تتحرك فيه الموجات. (ب) - الموجات الثانوية (ث) تعمل على تأرجح الجزيئات في اتجاه عمودي على اتجاه حركة الموجات.

العكس من ذلك، فإن أجهزة أخرى تصمم بحيث لا تتأثر بالحركة العنيفة لسطح الأرض التي تحدث قرب مصدر الزلزال.

وتزودنا التسجيلات التي نحصل عليها من المرجفة والمسماة بسجل المرجفة، بمعلومات كثيرة تتعلق بشكل الموجات الزلزالية. وهى شكل من أشكال الطاقة المرنة التي تنتشر في جميع الاتجاهات من البؤرة. ويمكن مقارنة تولد الطاقة بالاهتزاز الناشئ عن قطعة من الهلام في صحن عندما يغرف جزء منها بالمعلقة. وبينما يتصف الهلام بنوع

ولكى يتم الكشف على الزلازل الضعيفة جدا أو الزلازل القوية التي تحدث في أجزاء أخرى من العالم، فإن أجهزة رصد الزلازل تصمم بحيث تعمل على تضخيم الحركة الحقيقية لسطح الأرض. ولكن هناك حدود عملية لكمية التضخم الممكنة. كما تسجل المراجع كمية لا بأس بها مما نسميه بالتشويش الذي تسببه الرياح أو ارتطام الأمواج بشاطئ بعيد، أو حركة مرور المركبات الآلية القريبة. إن زيادة حساسية المراجع تعمل فقط على زيادة التشويش الذي يعتم بدوره على اهتزازات الزلازل الضعيفة. وعلى

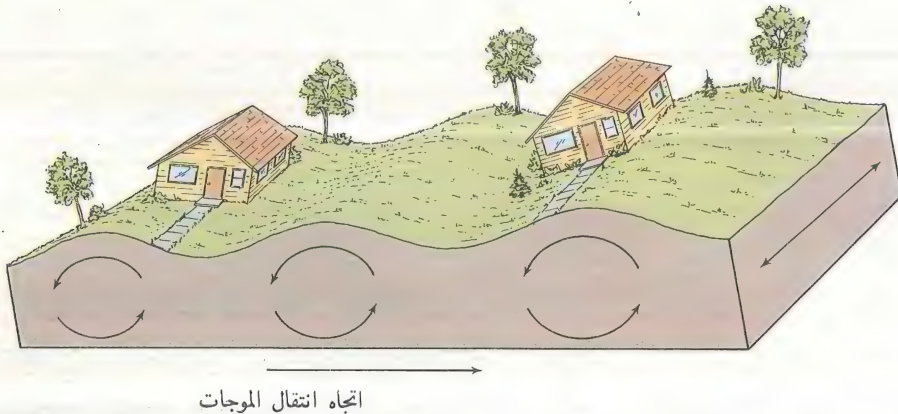
المؤثرة، فانه يمكن انتقال الموجات الأولية في كافة المواد. ومن ناحية أخرى، فان الموجات الثانوية تتغير فقط من شكل المادة المنتقلة خلالها. وبما أن السوائل لا تقاوم التغير في الشكل فان الموجات الثانوية لا تنتقل خلالها.

وتعتبر الموجات السطحية أكثر تعقيدا نوعا ما (شكل 14 - 10). وأثناء انتقال الموجات السطحية عبر سطح الأرض فانها تسبب في حركته وحركة كافة الأشياء القائمة فوقه بنفس الطريقة التي تقذف بها أمواج المحيط العاتية سفينة فوق سطح الماء. فبالإضافة الى حركة الموجات السطحية الى أعلى وإلى أسفل فهي تتحرك أيضا من جانب الى جانب آخر مشابه لحركة الموجات الثانوية المتجهة افقيا. وهذه الحركة الأخيرة هي سبب الدمار الذي يلحق بالمباني والأساسات.

وبملاحظة سجل نموذجي لمرجفة كما في شكل (14 - 11) فان أحد الفروق بين هذه الموجات الزلزالية يبدو واضحا. إذ تصل الموجات الأولية الى محطات التسجيل قبل الموجات الثانوية. وهذه بدورها تصل قبل الموجات السطحية. ويرجع ذلك الى السرعة النسبية لكل منها. ولغرض التوضيح فان سرعة الموجات الأولية عبر حجر الجرانيت في القشرة الأرضية تقدر بحوالى 6 كيلومترات، بينما تنتقل الموجات الثانوية تحت نفس الظروف بسرعة 3.5

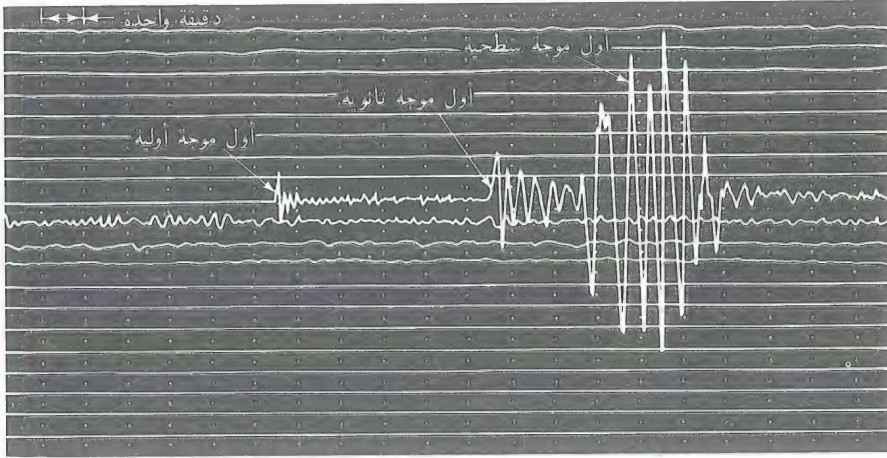
واحد من أنواع الاهتزاز فان سجل المراجف يظهر أن هناك مجموعتين رئيسيتين من الموجات الزلزالية تنشأ من انزلاق الكتل الصخرية. أحدهما ينتقل عبر الطبقات الخارجية للأرض يسمى بالموجات السطحية. أما المجموعة الأخرى من الموجات والمسماة بالموجات العميقة، فتنتقل خلال الأجزاء الداخلية للأرض. وتنقسم الموجات العميقة الى نوعين: موجات أولية (و) وموجات ثانوية (ث). وأساس هذا التقسيم هو الطريقة التي تنتشر بها هذه الموجات في المواد التي تنتقل عبرها. فالموجات الأولية (و) تدفع (تضغط على) الصخور وتجذبها (تدها) في اتجاه انتقال الموجات. وحركة هذه الموجات هي مشابهة تماما لحركة الحبال الصوتية عندما تحرك الهواء من جهة الى أخرى لاحداث الصوت. أما الموجات الثانوية (ث) فهي تهز الجزيئات في اتجاه عمودى على اتجاه انتقال الموجات. ويمكن توضيح ذلك بربط أحد طرفي حبل إلى ركيعة سورثم هز الطرف الآخر مع بقاء الحبل مشدودا.

لاحظ كما في شكل 14 - 9 أن انتشار الموجات الأولية يتضمن تغييرا في حجم وشكل المواد التي تتخللها، بينما يتضمن انتشار الموجات الثانوية تغييرا في الشكل فقط. وحيث أن جميع الأجسام الصلبة والسوائل والغازات تقاوم القوى الضاغطة وترتد الى موقعها بالمرونة بعد ازالة القوة



شكل 14 - 10

تتألف الموجات السطحية من نوعين من الحركات أحدها ينتج حركة معقدة الى فوق وإلى تحت شبيهة بموجات مياه المحيطات والأخرى تضرب في الأرض من جانب الى جانب أو ان يكون لها حركة رأسية.



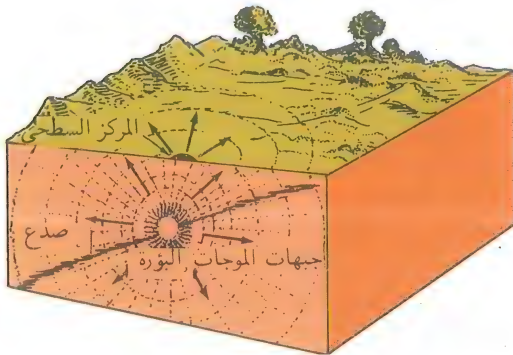
شكل 14 - 11

سجل اهتزازى نموذجى. لاحظ
الفترة الزمنية بين وصول كل نوع
من الموجات.

وكما سنرى فيما بعد فإن الموجات الزلزالية تستعمل فى تحديد موقع وشدة الزلزال. وبالإضافة الى ذلك فإن الموجات الزلزالية تزودنا بوسيلة لسبر أعماق الأرض.

تحديد مصدر الزلازل

تذكر أن البؤرة هى المكان الذى ينشأ فيه الزلزال عادة تحت سطح الأرض (شكل 14 - 12). والمركز السطحي، هو المكان الذى يعلو بؤرة الزلزال عند سطح الأرض.



شكل 14 - 12

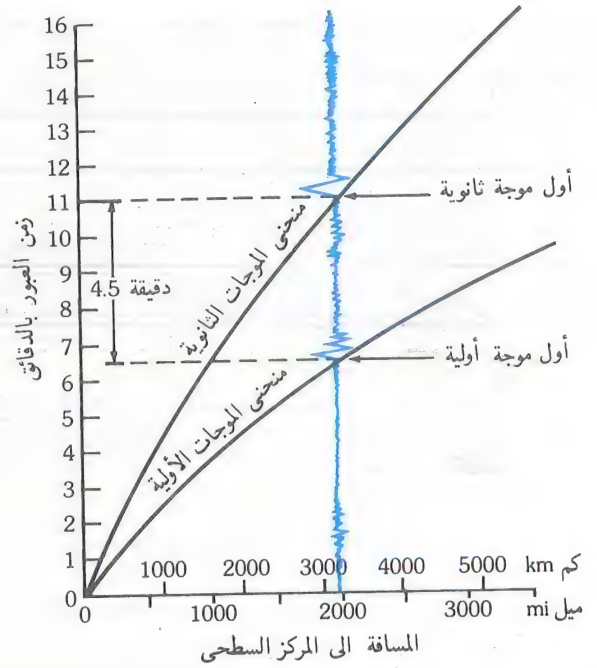
تقع بؤرة معظم الزلازل على عمق ويعرف الموقع السطحي الذى فوق البؤرة مباشرة بالمركز السطحي للزلزال.

كيلومترا فى الثانية. وتتوقف سرعة هذه الموجات فى المواد المنتقلة خلالها على الفروق فى الكثافة وخواص مرونة تلك المواد. ففي الماء مثلا تبلغ سرعة الموجات الأولية 1.5 كيلومترا فى الثانية بينما تبلغ سرعة الموجات الثانوية صفر كيلومترا فى الثانية. وتنتقل عموما الموجات الأولية فى المواد الصلبة بسرعة تعادل 1.7 ضعفا من سرعة الموجات الثانوية. كما يتوقع أن تنتقل الموجات السطحية بسرعة تعادل 0.9 مرة من سرعة الموجات الثانوية المنتقلة فى الطبقات التى تحتها.

وبالإضافة الى فروق السرعة، لاحظ أيضا كما فى شكل (14 - 11) بأنه توجد فروق فى الارتفاع أو على الأصح فى المقدار لهذه الأنواع من الموجات. فالموجات الثانوية مقدار أكبر قليلا من مقدار الموجات الأولية. بينما تتصف الموجات السطحية التى تسبب أغلب الدمار بمقدار أكبر كذلك. ونظرا لأن الموجات السطحية محدودة فى مساحة ضيقة قرب السطح ولا تنتشر عبر الكرة الأرضية كما هو الحال بالنسبة للموجات الأولية والثانوية، فإن الموجات السطحية تحتفظ بمقدارها الأقصى لمدة أطول. كما أن للموجات السطحية فترة أطول (الفترة هى الزمن الذى يفصل بين قمتين متتاليتين للموجة). ولذلك فقد يشار إليها بالموجات الطويلة أو موجات سطحية (ط).

هو موضح في شكل 14 - 13. ولقد تم تحسين الرسومات الأولى لزمن الوصول عندما أمكن الحصول على سجلات زلزالية من التفجيرات النووية، حيث أن مكان وزمان الانفجار معروفان بدقة مسبقا.

فباستعمال سجل الزلازل المبين في شكل 14 - 11 ومنحنى أزمنة الانتقال الموضح في شكل 14 - 13، نستطيع أن نحدد المسافة التي تبعد بها محطة التسجيل من موقع الزلزال. وبعد تحديد الفترة الزمنية بين الموجة الأولية الأولى والموجة الثانوية الأولى، يمكن تحديد موقع الزلزال على الرسم المبين لزمن الانتقال في الخط الذي يبين امتدادا زمنيا مماثلا بين منحنى الموجات الأولية والموجات الثانوية. ومن هذه المعلومات نستطيع أن نحدد أن موقع هذا الزلزال يبعد مسافة 3300 كيلومتر من جهاز التسجيل. ورغم أن بعد الزلزال يتحدد بهذه الطريقة إلا أن هذا البعد يمكن أن يتخذ أى اتجاه من محطة الرصد. وكما يتضح من شكل 14 - 14، فإن الموقع الحقيقي يمكن تحديده فقط بعد تحديد بعده من ثلاثة محطات مختلفة أو أكثر لا تقع على خط واحد. وبرسم دوائر



شكل 14 - 13

يستعمل رسم زمن العبور لتحديد بعد المركز السطحي للزلزال، والفرق بين زمنى الوصول لأول موجة أولية (و) وأول موجة ثانوية (ث) يساوى 4.5 دقيقة في هذا الرسم. وبذلك يكون بعد المركز السطحي 3200 كيلومتر تقريبا.

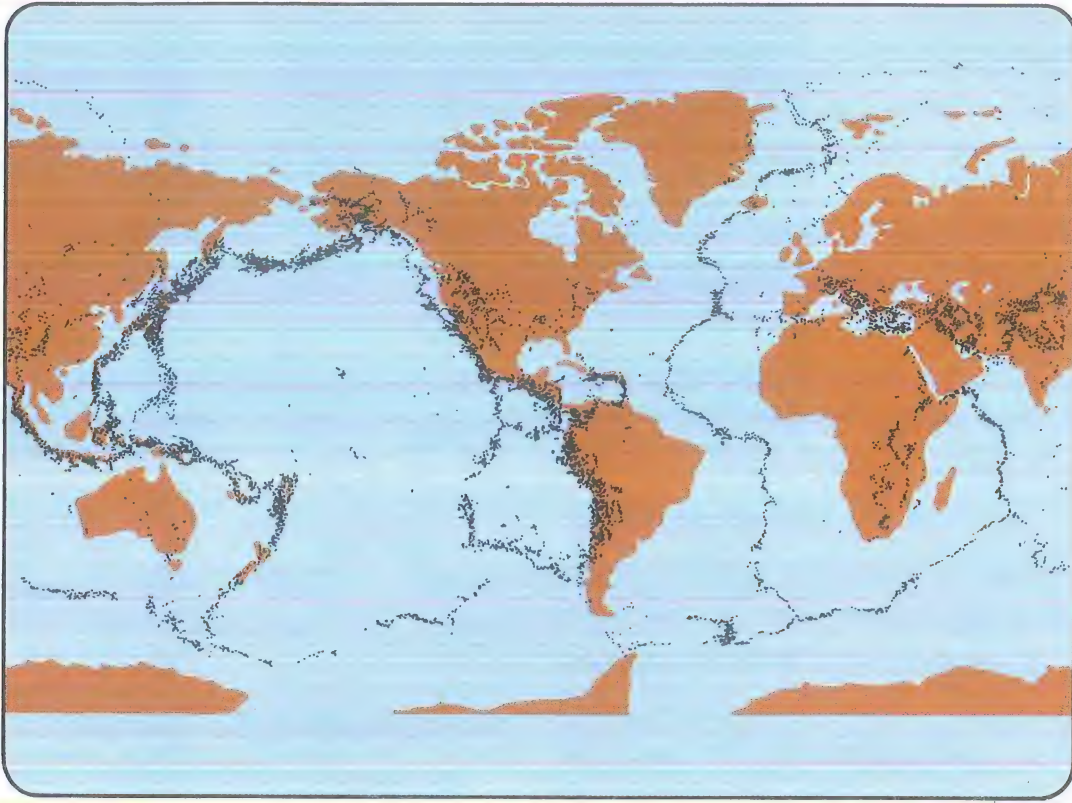


شكل 14 - 14

يتحدد موقع المركز السطحي للزلزال باستعمال الأبعاد الثلاثة التي أمكن الحصول عليها من ثلاثة محطات زلزالية.

ويزودنا الفرق بين سرعتى الموجات الأولية والموجات الثانوية بطريقة عملية لتحديد المركز السطحي للزلازل الضحلة. ويمكن تشبيه المبدأ المطبق بسباق بين سيارتين، أحدهما أسرع من الأخرى. وكلما زادت مسافة السباق زاد الفرق في زمن الوصول عند نهاية السباق. ولذلك فكلما كان الفرق كبيرا بين زمن وصول الموجات الأولية والموجات الثانوية كلما زادت المسافة الفاصلة بين المركز السطحي للزلزال وموقع المرجفة التي سجلته.

ولقد تم تطوير طريقة لتحديد مكان المركز السطحي للزلازل باستخدام سجلات اهتزازية من زلازل تم تحديد مركزها السطحي بسهولة من خلال أدلة واقعية. ومن هذه السجلات الزلزالية أمكن وضع رسومات لأزمنة الوصول، كما



شكل 14 - 15

التوزيع العالمى للزلازل خلال تسع سنوات.

يمثل نصف قطر كل منها بعد المركز السطحي لهذه المحطات، يمكن تحديد الموقع بدقة.

ولقد تم دعم دراسة الزلازل في الستينات من خلال الجهود المبذولة للتمييز بين التفجيرات النووية تحت الأرض والزلازل الطبيعية. فقد عمل المختصون على تأسيس شبكات رصد واسعة تحتوى على أكثر من 100 محطة لرصد الزلازل ينسق بينها مركز موحد في مدينة قولدن بولاية كولورادو الأمريكية. وتوجد أكبر هذه المحطات قرب بيللنقر بولاية مونتانا. وهى تحتوى على منظومة بها 525 جهاز تسجيل زلزالى، مقسمة الى 21 مجموعة تغطى منطقة يبلغ قطرها 200 كيلومتر. وباستعمال هذه المنظومة يمكن

الأحزمة الزلزالية

تحديد المركز السطحي للزلازل بواسطة حاسبات إلكترونية سريعة وذلك بطريقة المحاولة والخطأ.

تتركز 95 % من الطاقة المحررة بواسطة الزلازل في بضعة نطاقات ضيقة تطوق الكرة الأرضية (شكل 14 - 15). وينطلق أكبر مقدار من الطاقة في ممر قرب الحافة الخارجية للمحيط الهادى يعرف بالحزام المطوق للمحيط الهادى. ويشمل هذا الحزام مناطق ذات زلازل شديدة مثل اليابان والفلبين وشبلى وعدد من سلاسل الجزر البركانية والتي تمثلها الجزر الأليوشية. وهناك منطقة أخرى يتركز فيها

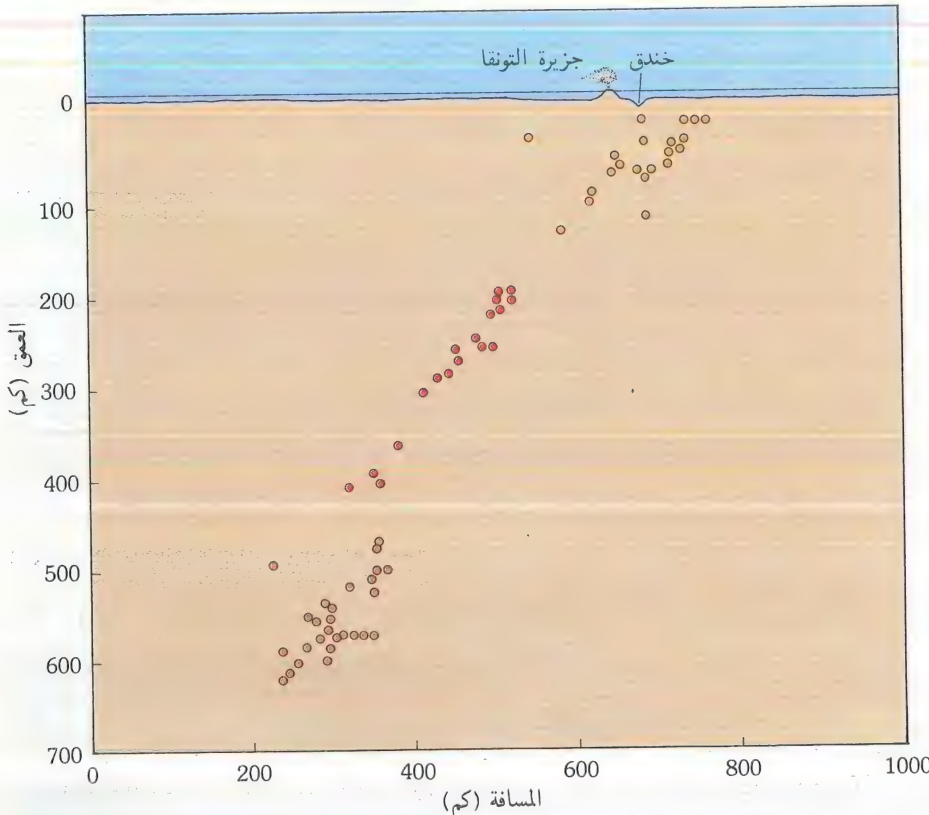
متوسطة. بينما تصنف الزلازل التي تقع بؤرها عند أعماق تزيد على 300 كيلومتر بأنها عميقة. ويقع حوالي 90 % من الزلازل عند أعماق تقل عن 100 كيلومتر. ويبدو أن جميع الزلازل القوية تنشأ عند أعماق ضحلة. فمثلا، في زلزال 1906 بسان فرانسيسكو، شملت الحركة الخمسة عشر كيلومترا العليا للقشرة الأرضية، في الوقت الذي كان لزلزال 1964 بالأسكا بؤرة عند عمق 33 كيلومترا. ويتضح من المعلومات الاهتزازية أن الزلازل ذات البؤر الضحلة قد وصلت حوالي 8.6 على مقياس ريختر. بينما كانت شدة أقوى الزلازل المتوسطة تحت 7.5. أما الزلازل ذات البؤر العميقة فلم تتجاوز 6.9 في مقدارها.

وعند رسم معلومات الزلازل حسب موقعها الجغرافي وعمقها، يمكن الحصول على عدة ملاحظات قيمة. فبدلا من

النشاط الزلزالي القوى تمتد عبر المناطق الجبلية المحاذية للبحر المتوسط عبر ايران وشرقها الى مركب جبال الهيمالايا. ويشير شكل 14 - 15 الى وجود حزام آخر مستمر يمتد آلاف الكيلومترات عبر محيطات العالم. ويتوافق النطاق مع نظام مرتفعات وسط المحيطات التي تمثل منطقة نشاط زلزالي متكرر ولكنه ضعيف الحدة.

أعماق الزلازل

يتضح من دراسة السجلات الاهتزازية أن الزلازل تنشأ عند أعماق تتراوح بين 5 و 100 كيلومتر. وبطريقة مصطلح عليها، تم تصنيف بؤر الزلازل حسب العمق الذي تحدث عنده. فالزلازل التي تنشأ عند أعماق لا تزيد عن 60 كيلومترا من سطح الأرض تعرف بأنها زلازل ضحلة. أما التي تنشأ بين 60 و 300 كيلومتر فتعتبر زلازل



شكل 14 - 16

توزيع بؤر الزلازل سنة 1965
حول جزيرة التونقا.

شدة الزلازل ومقدارها

اعتمدت المحاولات الأولى لتقدير شدة الزلازل على وصف الحادثة نفسها. ومن الواضح أن هذه الطريقة مشاكلها. إذ تتفاوت تقديرات البشر تفاوتاً كبيراً مما يجعل تصنيف شدة الزلازل أمراً صعباً للغاية. ثم استحدث العالم جوديبى ميركالى سنة 1902 تدرجاً موثقاً به إلى حد كبير، يعتمد على كمية الدمار الذى يلحق بأنواع مختلفة من هياكل المباني. وتستعمل هذه الطريقة في عدد من دول العالم (جدول رقم 14 - 1). ولكن الدمار الذى تسببه الزلازل لا يعد وسيلة ملائمة للمقارنة. فهناك عدة عوامل تسبب تفاوتاً في مقدار الضرر من بينها بعد المركز السطحي وطبيعة المواد السطحية وتصميم المباني. هذا بالإضافة إلى أن كثيراً من المراكز السطحية للزلازل لا يتوافق موقعها مع المناطق المأهولة بالسكان في العالم. وقد أدى ذلك إلى وضع طرق

التوزيع العشوائى للزلازل الضحلة والعميقة، يتضح وجود نمط محدد لهذا التوزيع. فقد وجد أن الزلازل التى تقع على امتداد نظام مرتفعات وسط المحيطات لها بؤر ضحلة دائماً. وهى عموماً زلازل ضعيفة. كما لوحظ أيضاً أن كل الزلازل عميقة البؤر تقع في الحزام المطوق للمحيط الهادى وعلى الأخص في المناطق التى تقع في اتجاه اليابسة من خنادق المحيط العميقة. ففي دراسة قام بها بينيوف في الجنوب الغربى للمحيط الهادى قرب خندق التونغا، اكتشف أن أعماق البؤر تزداد مع زيادة المسافة من الخندق كما هو موضح في الشكل 14 - 16. وتأخذ هذه المناطق الزلزالية التى تسمى نطاقات بينيوف نسبة إلى الرجل الذى اهتم بدراستها، اتجاهها ميل 45° مع سطح الأرض. لماذا تحدث الزلازل على امتداد نطاق ضيق يغوص حوالى 700 كيلومتر في أعماق الأرض؟ سوف نتناول هذا السؤال بشئ من التفصيل في الفصل السادس عشر.

جدول 14 - 1

سلم الشدة المعدل لمركال

- 1 - لا يحس به إلا القليل جداً وتحت ظروف ملائمة.
- 2 - يحس به القليل عند الراحة وعلى الأخص في الأدوار العليا للمباني.
- 3 - يحس به الكثير في داخل المباني وعلى الأخص في الأدوار العليا للمباني ولكن الكثير منهم لا يصنفه كزلازل.
- 4 - خلال النهار يحس به الكثيرون داخل المباني والقليل خارج المباني فيشعرون بما يشبه اصطدام سيارة شاحنة بمبنى اسمتى.
- 5 - يشعر به كل إنسان تقريباً. يصحى الكثير من نومهم - تهتز الأشجار وجميع الأشياء التى لها ارتفاع كبير.
- 6 - يشعر به الجميع والكثير يهرعون خوفاً إلى خارج المباني. كما يحرك الأثاث الثقيل، كما تسجل حالات لتساقط الطلاء وتسليخ جدران المداخل.
- 7 - يهرع الجميع خارج المباني، دمار محدود للمباني ذات التصميم الجيد. ودمار قليل أو متوسط للمباني العادية ودمار كبير للمباني ذات التصميم الرديء أو البناء الضعيف.
- 8 - الدمار طفيف في المباني جيدة التصميم وكثير في المباني العادية مع التحطم الجزئى وعظيم في المباني ذات البناء الرديء (سقوط المداخل، وإعمدة المصانع، والدعامات والنصب التذكارية والمجدران).
- 9 - الدمار كبير جداً في المباني جيدة التصميم - إزاحة المباني عن قواعدها، تشقق واضح في الأرض.
- 10 - دمار بعض المباني الخشبية، دمار معظم المباني الصخرية والقوالب مع قواعدها، تشقق كبير في الأرض.
- 11 - قليل من المباني الصخرية تبقى قائمة، تتحطم الجسور، شروح واسعة في الأرض.
- 12 - الدمار شامل، يتم رؤية الموجات على سطح الأرض أثناء الزلازل. تتناثر الأشياء عالياً في الهواء.

جدول 14 - 2

درجات الزلازل واحتمالية حدوثها عالميا

درجات مقدار ريختر	اثر الزلازل	العدد المقدّر سنويا
< 3.5	عادة لا نحس به ولكن يمكن تسجيله	900,000
3.5 - 5.4	كثيرا ما نحس به ولكن الدمار الذى يحدثه قليل.	30,000
5.5 - 5.0	دمار طفيف للانشاءات	500
6.1 - 6.9	قد يكون مدمرا فى المناطق المأهولة بالسكان	100
= 8	زلازل كبيرة ذات آثار مدمرة زلازل عظيمة تسبب دمارا شاملا لكل المواقع المأهولة القريبة	20 واحدة فقط كل 5 - 10 سنوات

فى جميع أنحاء العالم لزلازل معين فان تعديلات يجب أن تتم لتحسين الموجات الزلزالية المتضعة بعد خروجها من البؤرة إلى جانب ضبط حساسية جهاز التسجيل. وقد اعتمد ريختر مائة كيلومتر كمسافة قياسية كما اعتمد جهاز وود اندرسون كجهاز تسجيل قياسي.

ولقد بلغ مقدار أقوى زلزال حتى الآن حوالى 8.6 على مقياس ريختر. فقد اطلقت هذه الصدمات القوية ما مقداره 2610^{10} إرج من الطاقة. وهذا يساوى تقريبا تفجير بليون طن من مادة ت. ن. ت. ويبدو أنه لم يقع أى زلزال يزيد مقداره عن 9. وبالمقابل فان الزلازل التى يقل مقدارها عن 3.5 على مقياس ريختر لا يشعر بها الانسان. أما بعد تطوير أجهزة تسجيل ذات حساسية أكبر، فقد أمكن تسجيل زلازل يساوى مقدارها (2). ويوضح جدول 14 - 2 العلاقة بين مقدار الزلازل وآثارها.

وكما رأينا سابقا فان الزلازل تختلف كثيرا فى قوتها، ولذلك فان ارتفاعات الموجات المولدة تتفاوت بآلاف المرات تبعاً لهذا الاختلاف. ومن أجل استيعاب هذا التفاوت الكبير فقد استعمل ريختر مقياساً لوغاريتمياً للتعبير عن المقدار وعلى هذا المقياس إذا تضاعف ارتفاع الزلزال عشر مرات فان ذلك يقابله زيادة وحدة واحدة على مقياس المقدار.

لتحديد كمية الطاقة المحررة اثناء الزلزال ويعبر عن هذا القياس بالمقدار.

ومثالاً، يمكن تحديد مقدار الزلزال من كمية المواد المنزلقة على امتداد فالق، ومن المسافة التى تنزاح بها هذه المواد. وحتى فى أحسن الظروف مثل ما هو موجود فى زلزال 1906 بسان فرانسيسكو حيث يظهر خط الفالق، وحيث يمكن قياس الازاحة من أدلة طبيعية، فان هذه الطريقة لا توفر الا تقديرات تقريبية للقوى المؤثرة. وفى كثير من الزلازل لا تصل آثار الصدوع الى السطح، ولذلك فانه لا يمكن قياس مقدار الازاحة مباشرة. وفى سنة 1935 حاول تشارلز ريختر بمعهد كاليفورنيا للتقنية أن يصنف زلازل جنوب كاليفورنيا الى مجموعات ذات مقدار كبير ومتوسط وصغير. ويحدد النظام، الذى طوره، مقادير الزلازل من الحركات التى تقاس بالأجهزة الاهتزازية.

ويستعمل اليوم سلم ريختر المحسن بكثرة لوصف مقدار الزلازل. ويتم حساب المقدار على هذا السلم بقياس مقدار أكبر موجة فى سجل المرجفة. ورغم أن المراجع تضخم بشدة حركة الأرض، فان الزلازل ذات المقدار الكبير سوف تحرك قلم التسجيل مسافة أبعد من الزلازل ذات المقدار الصغير. ولكى تكون محطات التسجيل صالحة لتسجيل نفس المقدار

جدول 14 - 3 بعض زلازل العالم المشهورة

السنة	الموقع	عدد الموتى	درجة الزلزال	ملاحظات
1290	شهل (هوبى)، الصين	100,000		
1556	شينسى، الصين	830,000		ربما كانت أكبر الكوارث الطبيعية
1737	كلكتا، الهند	300,000		
1755	لشبونة، البرتغال	70,000		دمار كبير للتسونامى
1811 - 12	مدريد الجديدة، ولاية ميزورى	قليل		ثلاثة زلازل كبيرة
1886	كارلستون، جنوب كارولينا	60		
1906	سان فرانسيسكو، كاليفورنيا	700	8.25	سببت الحرائق دمارا كبيرا
1908	مسينا، إيطاليا	120,000	7.5	
1920	كانسو، الصين	180,000	8.5	
1923	طوكيو، اليابان	150,000	8.2	سببت الحرائق دمارا كبيرا
1960	جنوب سيلي	5,700	8.5 - 8.7	ربما يكون أكبر زلزال تم تسجيله حتى الآن.
1964	ألاسكا	131	8.4 - 8.6	
1970	بيرو	66,000	7.8	تهدم صخرى كبير
1971	سان فرناندو، كاليفورنيا	65	6.5	زادت الخسائر عن 500 مليون دولار
1975	اقليم لياونينج، الصين	قليل	7.5	أول زلزال قوى يتم التنبؤ به
1976	تانجشان، الصين	650,000	7.6	لم يتم التنبؤ به

وفي جدول 14 - 3 قائمة لبعض الزلازل الرئيسة في العالم ومقاديرها على مقياس ريختر. ومن المتوقع أن تحدث مثل هذه الزلازل الكبيرة في المناطق ذات النشاط الحركى كل 50 الى 200 سنة. فمناطق فالق سان أندرياس الذى تسبب فى زلزال سان فرانسيسكو عام 1906 لم تشهد أى زلزال كبير منذ أكثر من 75 عاما. ويعد ذلك احصائية مزعجة لسكان هذه المنطقة.

وتظهر الدراسات الحديثة أن مقياس ريختر لا يفرق بدقة بين الزلازل التى لها مقادير كبيرة جدا. وحيث أن جميع الزلازل القوية جدا لها موجات ذات ارتفاعات متساوية تقريبا، فان مقياس ريختر يصل الى درجة التشبع فى هذا المستوى. ونتيجة لذلك فقد تم اقتراح طرق لتعديل مقياس

ولذلك فان ارتفاع أكبر موجة سطحية لزلزال مقداره 5 هو أكبر عشر مرات من ارتفاع موجة ناشئة عن زلزال مقداره 4. وعلاوة على ذلك فان زيادة وحدة واحدة فى المقدار على مقياس ريختر يعادلها تقريبا زيادة ثلاثين ضعفا من الطاقة المنطلقة. ولذلك فان أى زلزال مقداره 6.5 يطلق طاقة أكبر ثلاثين مرة من الطاقة المحررة لزلزال مقداره 5.5 وأكبر تسعمائة مرة من الطاقة لزلزال مقداره 4.5. فالزلزال الكبير الذى مقداره 8.5 يطلق طاقة أكبر ملايين المرات من أصغر زلزال يشعر به الانسان. وهذا يجب أن يبدد الشعور القائل بأن الزلازل المتوسطة القوة تقلل من فرصة وقوع زلازل قوية فى نفس المنطقة، حيث أن الطاقة المنطلقة من زلزال واحد قوى تساوى الطاقة المنطلقة من آلاف الزلازل.

الولاية 8.4 - 8.6 على مقياس ريختر. ودام لمدة 3 - 4 دقائق. وخلال هذه المدة القصيرة، لقي مائة وأربعة عشر شخصا حتفهم وآلاف صاروا بدون مأوى. وقد لحقت أضرار كبيرة باقتصاد الولاية (شكل 14 - 17). ولو كانت المدارس مفتوحة لكانت الاصابات أكثر بالتأكيد. وقد قدرت الخسارة المادية بمبلغ 300 مليون دولار. ويوضح شكل 14 - 17 المركز السطحي للزلزال والمدن التي كان تأثيره عليها بالغا. وقد تم تسجيل 28 رجّة تلوية خلال 24 ساعة من الهزة الأصلية زاد مقدار عشرة منها عن 6 درجات على مقياس ريختر.

وتحدد عدة عوامل كمية الدمار الذي يصاحب أى زلزال. وأوضح هذه العوامل هي مقدار الزلزال وقربه من المناطق المسكونة. ولحسن الحظ فإن معظم الزلازل صغيرة وتحدث في المناطق النائية من سطح الأرض، ولكن يتم

ريختر بحيث يستطيع قياس مقادير الزلازل الكبيرة بدقة. وتحلل إحدى هذه الطرق الموجات الاهتزازية الطويلة جدا لهذا الغرض. وعلى هذا المقياس المطول يمكن القول بأن زلزال سان فرانسيسكو لسنة 1906 م، ذا الموجة السطحية البالغ مقدارها 8.3 ستصبح 7.9. أما زلزال آلاسكا لسنة 1964 م ذو المقدار البالغ 8.4 الى 8.6 سيزداد الى 9.2 باستعمال هذا النظام. أما أعنى زلزال فهو ذلك الذى حدث بشيلي سنة 1960 م بمقدار 9.5.

دمار الزلازل

كان أعنى زلزال أصاب أمريكا الشمالية في هذا القرن هو زلزال الجمعة المباركة (قودفرايداي) بآلاسكا الذى حدث عند الساعة 5:36 من مساء يوم 27 - 3 - 1964 م. وقد بلغ مقدار هذا الزلزال الذى شعر به سكان جميع مناطق



شكل 14 - 17

المنطقة التى تأثرت بزلزال ما يعرف بالجمعة المباركة، 1964 . لاحظ موقع المركز السطحي (البقعة الحمراء).

الاعلان سنويا عن حوالى 20 زلزالا رئيسا من بينها واحد مدمر أو اثنان على الأكثر.

وأثناء حدوث أى زلزال، تشهد المنطقة الواقعة في حدود 20 - 50 كيلومترا من مكان الصدع، نفس الدرجة من اهتزاز الأرض. ويتناقص الاهتزاز بسرعة في المناطق الأبعد من ذلك. وفي بعض الحالات، خلال الزلازل ذات العنف المتميز مثل زلزال مدريد الجديدة لسنة 1811، حيث كانت منطقة التأثير أكبر بكثير. أما المركز السطحي لذلك الزلزال فيقع مباشرة جنوب مدينة القاهرة بولاية النوى. وقد شعر السكان به من خليج المكسيك جنوبا حتى كندا شمالا ومن جبال الروكى غربا حتى شاطئ المحيط الأطلسى شرقا.

الدمار الذى تسببه الموجات الاهتزازية

لقد زود زلزال الأسكا لسنة 1964، الجيولوجيين بمفاهيم جديدة عن دور الاهتزازات الأرضية كقوة مدمرة. فبينما تنتقل الطاقة المنطلقة أثناء الزلزال على امتداد سطح الأرض، فانها تسبب اهتزازات في الأرض بطريقة معقدة فتحركها الى أسفل وإلى أعلى. هذا الى جانب تحركها يمين ويسرة. وتعتمد كمية الدمار التى تسببها الاهتزازات على عدة عوامل: (1) حدة ومدة الاهتزازات. و (2) طبيعة المواد التى يقع عليها المبنى. و (3) تصميم المبنى.

ولقد دمرت الاهتزازات جميع المباني متعددة الأدوار في مدينة الاسكا. أما المباني الخشبية الأكثر مرونة التى تستعمل كمساكن فقد كانت أحسن حظا. وفي شكل 14-18 مثال واضح عن أثر اختلاف التصميم على الدمار الذى تحدثه الزلازل. نستطيع أن نرى بوضوح أن هيكل المبنى المصنوع من الصلب في يسار الصورة قد قام الاهتزازات، بينما انهار المبنى الاسمنتى عديم المرونة عن آخره.

ويمكن أن تعزى الخسارة في الأرواح الناشئة عن الزلزال الى نوع المبنى المسكون. ففي سنة 1556، لقي

حوالى 830,000 نسمة حتفهم بإقليم شلنس بالصين عندما حطم زلزال في الصباح الباكر المنطقة بأسرها. وكان الكثير من السكان يقطنون مساكن حفرت في رواسب ريحية دقيقة الحبيبات تسمى رسوبيات الغرين (أنظر الفصل الثانى عشر). فقد تهاوت جدران هذه المباني تاركة السقوف تروم سكانها. كما أن ازدحام السكان مع الطرق الحالية المتبعة في بناء المساكن في هذه المنطقة يجعلان احتمال تكرار حادثة 1556 أمرا ممكنا.

لقد لحق الضرر بمعظم المباني الكبيرة في مدينة انكوراج بالأسكا رغم أنه روعى في بنائها مطابقتها لمواصفات مباني الزلازل الصادرة عن نظام المبنى الموحد لولاية كاليفورنيا. وقد يرجع الدمار المكثف الى الفترة الطويلة غير العادية التى استغرقها الزلزال والتى قدرت بحوالى 3 - 4 دقائق. وتتكون معظم الزلازل من رجات تدم 20 ثانية الى دقيقة واحدة. تذكر أن زلزال 1906 في سان فرانسيسكو قد استمر ما يقارب من 40 ثانية.

وتتعرض المنطقة الواقعة في نطاق 20 - 50 كيلومترا من المركز السطحي للزلزال لنفس الدرجة تقريبا من الاهتزاز الأرضى ولكن هناك تفاوت كبير في درجة الدمار داخل هذه المنطقة ويرجع هذا التفاوت بشكل رئيسى الى طبيعة الأرض التى أسست عليها المباني. فمثلا تعمل الرواسب غير المتماسكة، على تضخيم الاهتزازات الى درجة أكبر من الطبقات الصخرية. ولذلك فان المباني الواقعة في مدينة انكوراج والتى بنيت فوق رسوبيات غير متصلبة، قد تعرضت الى دمار كبير. وعلى العكس من ذلك فان معظم مدينة وتير قد تعرضت لدمار أقل من جراء الموجات الاهتزازية، رغم وقوعها في منطقة أقرب الى المركز السطحي من موقع مدينة انكوراج، وذلك لأن مدينة وتير تقع على قاعدة صلبة من صخور الجرانيت. ومع ذلك فقد دمرتها موجة بحرية اهتزازية.

لقد أثر هذا الزلزال في مناطق تبعد آلاف الكيلومترات



شكل 14 - 18

الدمار الذي لحق بمبنى شركة جى. سى بينى المكون من خمسة طوابق بمنطقة انكوراج - ألاسكا. قليل جدا من الدمار لحق بالمباني المجاورة.

وتعتبر السيشس خطيرة في بحيرات المياه المتجمعة خلف السدود الترايية. وقد عرف عن هذه الموجات بأنها ترتطم بجدران الخزانات وتضعف قوة هيكلها وبذلك تهدد حياة السكان القاطنين في الوادي أسفل هذه الخزانات. ومن الآثار الأخرى القوية، تقلب سطح الماء في الآبار استجابة للاهتزازات الكبيرة. فأتثناء هذا الزلزال ظهرت آثار الاهتزازات في آبار عديدة على طول المنطقة الواقعة بين

من المركز السطحي حيث جعل الأرض تهتز كما لو كانت شوكة رنانة ضخمة. وقد تسببت الموجات الأرضية المضخمة في الارتطام الايقاعى للماء (سيشس)، في البحيرات والخزانات والأحواض المغلقة في مناطق يتجاوز بعدها خليج المكسيك. ففي بحار ساحل تكساس حطمت موجة ارتفاعها متران قاربا صغيرا بينما لوحظ تكون موجات أصغر في أحواض السباحة في كل من ولايتي تكساس ولويسيانا.

حصاة في بركة ماء، وعلى خلاف التموجات فان التسونامي يتقدم بسرعة تتراوح بين 500 و 800 كيلومتر في الساعة. وبالرغم من هذه الصفة المميزة فالتسونامي قد يمر بعرض المحيط دون أن يشعر به أحد لأن ارتفاع موجاته عادة يقل عن المتر والمسافة بين ذروتي موجاته تتراوح بين 100 و 700 كيلومتر. ولكن بعد دخول هذه الموجات المدمرة الى المياه الشاطئية الضحلة، تنخفض سرعتها وتبدأ مياهها في التراكم فوق بعضها الى ارتفاع يزيد أحيانا عن 30 مترا. ويظهر التسونامي عند وصوله الى الشاطئ كارتفاع مفاجيء في مستوى سطح الماء مع تعكر في مياهه وعدم انتظام سطحه.

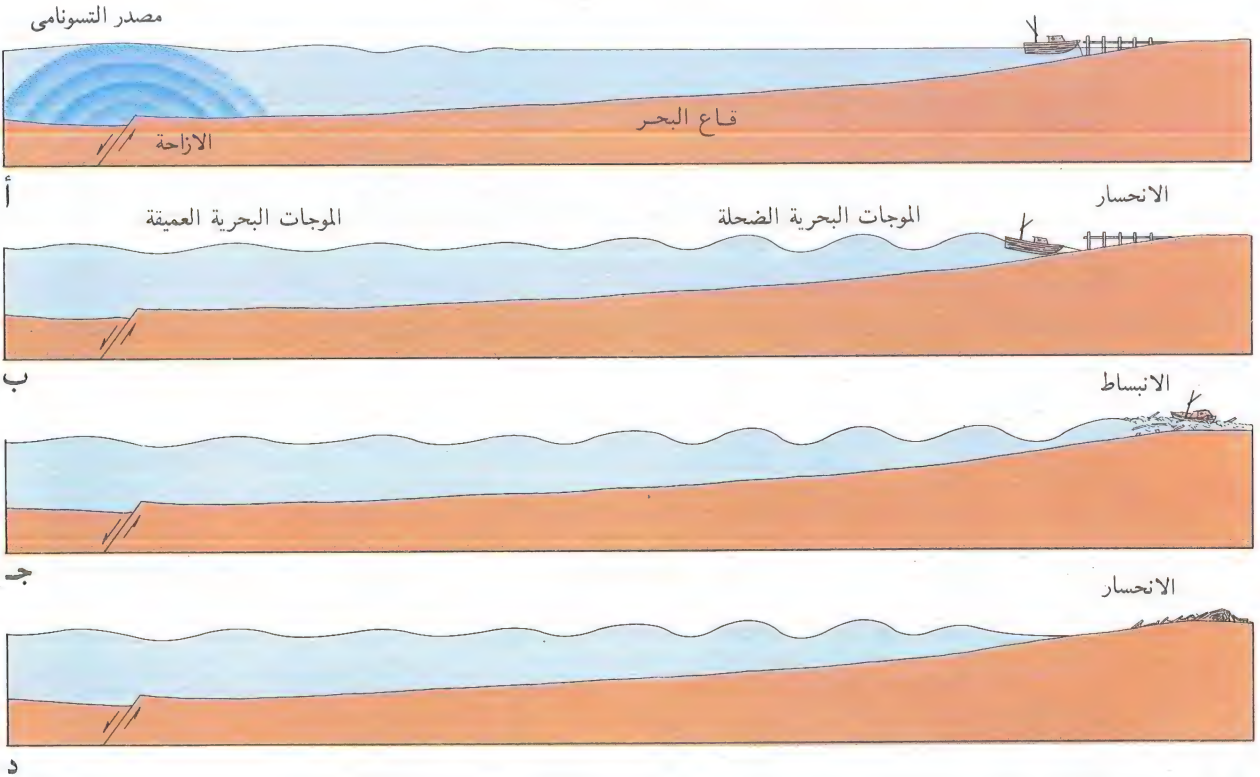
وأول علامات التسونامي عادة هو الانحسار السريع لمياه البحر بعيدا عن الشواطئ (شكل 14 - 19). ولقد

ولايتي داكوتا الجنوبية في الغرب وجورجيا في الشرق. وقد بلغ أقصى تقلب في مستوى المياه 3.5 مترا.

الموجات البحرية الاهتزازية (التسونامي)

لقد كان سبب معظم الوفيات المصاحبة لزلازال ألاسكا سنة 1964 هو الموجات البحرية الاهتزازية، أي التسونامي. وقد كانت هذه الأمواج المدمرة تعرف بموجات المد والجزر، ولكن هذه التسمية غير مناسبة لأن هذه الموجات لا تنشأ عن تأثير المد والجزر الذي يسببه القمر أو الشمس.

فمعظم أنواع التسونامي تنتج عن الازاحة الرأسية لقاع المحيطات أثناء الزلازال كما هو موضح في شكل 14 - 19. وتشبه التسونامي عند تكونها الموجات الناتجة عن رمي



شكل 14 - 19

رسم توضيحي لموجات التسونامي التي يسببها انزلاق في قاع المحيط حجم التموجات وابعادها ليست مقاسة بنفس مقياس الرسم.

قياس المد والجزر بجزيرة أهيلو- هاواي، ولعدة أيام لاحقة، هذه الأمواج المتناقصة في قوتها أثناء تلاطمها عبر المحيط الهادى.

أما موجة التسونامى التى ولّدها زلزال ألأسكا سنة 1964 فقد أوقعت دمارا كبيرا فى المناطق السكنية القريبة من خليج ألأسكا. كما دمرت مدينة تشينيقا عن آخرها. كذلك حل دمار كبير بمدينة كودياك كما هلكت معظم سفن اسطول الصيد بها عندما حملت موجة بحرية اهتزازية أعدادا من سفنه الى الحى التجارى بالمدينة (شكل 14 - 20). وقد بلغ عدد ضحايا التسونامى 107 شخصا فى الوقت الذى بلغ فيه عدد ضحايا الزلزال فى مدينة انكوراج 9 أشخاص فقط كنتيجة مباشرة للاهتزازات. ولقد امتد الدمار عقب زلزال ألأسكا الى معظم مناطق الشاطئ الغربى لقارة أمريكا الشمالية. ورغم أن انذارا قد سبق

تعود قاطنوا الشواطىء أن يستجيبوا لهذا التحذير بترك مساكنهم والانتقال الى مناطق مرتفعة. إذ بعد حوالى خمسة الى ثلاثين دقيقة يتبع انحسار المياه موجة عارمة قادرة على تغطية مئات الأمتار من الأرض المجاورة للشاطئ. وبشكل متتابع فان كل موجة يتلوها تراجع سريع للمياه فى اتجاه المحيط. وهذه الموجات التى تفصلها عن بعضها البعض فترات تتراوح بين 10 دقائق و 60 دقيقة، القدرة على قطع مساحات شاسعة من مياه المحيطات قبل أن تخمد طاقتها تماما. فقد قطعت موجة التسونامى الناشئة عن زلزال تشيلى سنة 1960 مسافة 17,000 كيلومتر عبر المحيط الهادى حتى وصلت اليابان. هذا الى جانب التدمير الذى أصاب القرى الشاطئية الواقعة على رقعة تمتد 800 كيلومتر من شاطئ أمريكا الجنوبية، حيث لحق دمار كبير بالقرى الواقعة على الشاطئ الجنوبى لجزيرة هونشو اليابانية. وذلك بعد وقوع الزلزال بحوالى 22 ساعة. وقد سجلت أجهزة



شكل 14 - 20

عصفت أمواج التسونامى بأسطول الصيد هذا ورمت به فى قلب قرية كودياك بآلاسكا.

15 مترا عدة قرى ساحلية في خراب، بما دفع مصلحة مساحة الأراضي والسواحل لاستحداث نظام الانذار المبكر للتسونامي في المناطق الساحلية الواقعة على شاطئ المحيط الهادى. فمن مرصد الزلازل في المنطقة ترسل تقارير عن الزلازل الكبيرة الى مركز الانذار المبكر للتسونامى بمدينة هونولولو. ويمكن تحديد ماهية الموجات الناشئة باستخدام أجهزة قياس المد والجزر. وخلال ساعة يمكن بث التحذيرات اللازمة. ورغم انتقال موجات التسونامى بسرعة كبيرة، فان هناك وقت كافٍ لاختلاء كل المناطق عدا المنطقة الواقعة حول المركز السطحي للزلازل (شكل 14 - 21). فموجات التسونامى المتولدة عند الجزر الأليوتشية مثلا تستغرق حوالى 5 ساعات للوصول الى هاواى وتلك المتولدة قرب شاطئ شيلي تستغرق 15 ساعة قبل أن تصل الى هاواى. ولحسن الحظ لا ينتج عن معظم الزلازل موجات تسونامى. وفي المتوسط فان هناك حوالى 1.5 تسونامى مدمرة تتكون في

الحادثة بساعة فقد هلك 12 شخصا في مدينة كريسانت بولاية كاليفورنيا حيث زهقت كل هذه الأرواح وحدث معظم الدمار بسبب الموجة الخامسة. فقد ارتفعت الموجة الأولى 4 أمتار فوق الجزر وقد لحقتها ثلاثة موجات متدرجة في الصغر وظن الناس أن موجة التسونامى قد هدأت فعادوا الى الشاطئ حيث قابلتهم الموجة الخامسة التى كانت أكثر تدميرا والتى توافقت مع موجة المد مما جعلها ترتفع 6 أمتار فوق مستوى الجزر.

ورغم أن معظم موجات التسونامى تولدها الزلازل إلا أن بعض أنواعها المدمرة قد تنشأ عن اندلاع البراكين. فقد ولد انفجار بركان كاراكاتوا سنة 1883 موجة التسونامى التى أغرقت ما يقدر بحوالى 36,000 شخص من سكان جزيرتى جاوة وسومطرة.

وفي عام 1946 ضربت موجة تسونامى ضخمة جزر هاواى دون سابق انذار وقد تركت الموجة التى بلغ ارتفاعها



شكل 14 - 21

الخطوط تمثل مستويات أزمنة العبور لموجات التسونامى الى هونولولو بجزر هاواى من مواقع مختلفة في المحيط الهادى.

تم نقل مدينة فالديز سبعة كيلومترات في موقع أكثر استقراراً الى الداخل. وما زاد الخسارة موت 31 نسمة كانوا ينتظرون سفينة انقاذ قادمة حيث وقع الرصيف الذى كانوا فوقه في البحر بمن عليه.

ويعزى معظم الدمار الذى أصاب مدينة انكوراج الى الانهيارات الأرضية والتي سببها اهتزاز سطح الأرض. فقد دمرت كثير من المنازل في تورنا جين هايتس عندما فقدت طبقة من الطين قوتها وحملت معها مساحة تزيد عن 200 هكتار من الأراضي في اتجاه المحيط (شكل 14 - 22). وقد كان الدمار شاملاً حتى أنه تمت تسوية هذه المساحة بعد ذلك وحولت الى منتزه اطلق عليه اسم منتزه الزلازل. أما وسط مدينة انكوراج فقد تهدم وصار كتلاً مفككة من التراب وقد هبط مستوى سطح بعض المناطق في الحى التجارى بما يعادل 3 أمتار.

التنبؤ بالزلازل وتجنب أخطارها

لقد تسببت الاهتزازات التى أصابت سان فرناندو بكاليفورنيا صباح يوم 9 / 2 / 1971 في وفاة 64 شخصاً وفي خسارة مادية بلغت حوالى الألف مليون دولار (شكل 14 - 23). وسبب كل ذلك زلزال معتدل القوة بلغت درجته 6.6 على مقياس ريختر واستمر لمدة 60 ثانية. ولحسن الحظ وقع الزلزال في الساعات الأولى من النهار، حيث يقل الازدحام في الطرقات والمتاجر والمدارس مما قلل من الخسارة في الأرواح. ولو تهدم السد الذى يحجب بحيرة فان نورمان والذى اصابه عطب بالغ، لفقد 80,000 آخرون حياتهم ولوقعت كارثة لم يسبق لها مثيل في تاريخ المنطقة. وقد أكد هذا الزلزال الذى وقع في المنطقة المزدحمة لجنوب ولاية كاليفورنيا، من جديد الحاجة الى طرق يعتمد عليها في التنبؤ بالزلازل وتفايد أخطارها.

وقد أدى موقع اليابان الكثير الزلازل الى الحاجة الملحة في التنبؤ بها. فقد نشر اليابانيون شبكة معقدة من أجهزة تسجيل الاهتزازات تمتد 200 كيلومتر في المحيط فهناك في

مواقع مختلفة من العالم كل سنة. وموجة واحدة فقط في عشر سنوات تصل الى مستوى الكارثة.

الحرائق

لقد تسبب زلزال ألاسكا سنة 1964 في حرائق محدودة. ولكن غالباً ما تكون الحرائق أكثر دماراً. اذ يذكرنا زلزال 1906 في سان فرانسيسكو بالتهديد الخطير للحرائق. فقد احتوى مركز المدينة على مباني من الخشب والأجر. ورغم الدمار الكبير الذى لحق عدداً من المباني غير المسلحة الا أن الدمار الأكبر قد نشأ عن عدد كبير من الحرائق التى شبت عندما تحطمت خطوط الغاز وانقطعت خطوط الكهرباء. وقد اشتعلت النيران دون سيطرة لمدة ثلاثة أيام وأحرقت ما يربو عن 500 مجموعة سكنية من المدينة (شكل 14 - 2). وما زاد الأمر تعقيداً الاهتزاز الأولى للأرض الذى قطع انابيب المياه بالمدينة في مئات من المواقع.

وقد تم اخمد النيران عندما نسف عدد من المباني على امتداد طريق رئيسي بالمدينة كحاجز ضد امتداد النيران. ورغم أن الخسارة في الأرواح بسبب النيران كانت قليلة هذه المرة، فهي لم تكن كذلك دائماً، فقد حدث زلزال في اليابان سنة 1923 تسبب في 250 حريقاً اكتسحت مدينة يوكوهوما، ودمرت أكثر من نصف المباني السكنية في مدينة طوكيو. وقد زادت الوفيات بسبب الحرائق التى نشرتها رياح عاتية عن 100,000 نسمة.

الانهيارات الأرضية وهبوط سطح الأرض

أثناء زلزال ألاسكا سنة 1964، لم تكن الهزات الأرضية سبباً مباشراً في الدمار الشامل الذى أصاب المباني، بل حدث ذلك نتيجة للانهيارات الأرضية والهبوط في سطح الأرض الذى سببته هذه الاهتزازات. فقد سبب الاهتزاز الشديد في منطقة فالديز وسى وورد في سيولة مواد الدلتا مما أحدث انجرافاً انتقلت بسببه المواد الشاطئية في اتجاه البحر. وبسبب التخوف من تكرر هذه الحادثة ثانية فقد



شكل 14 - 22

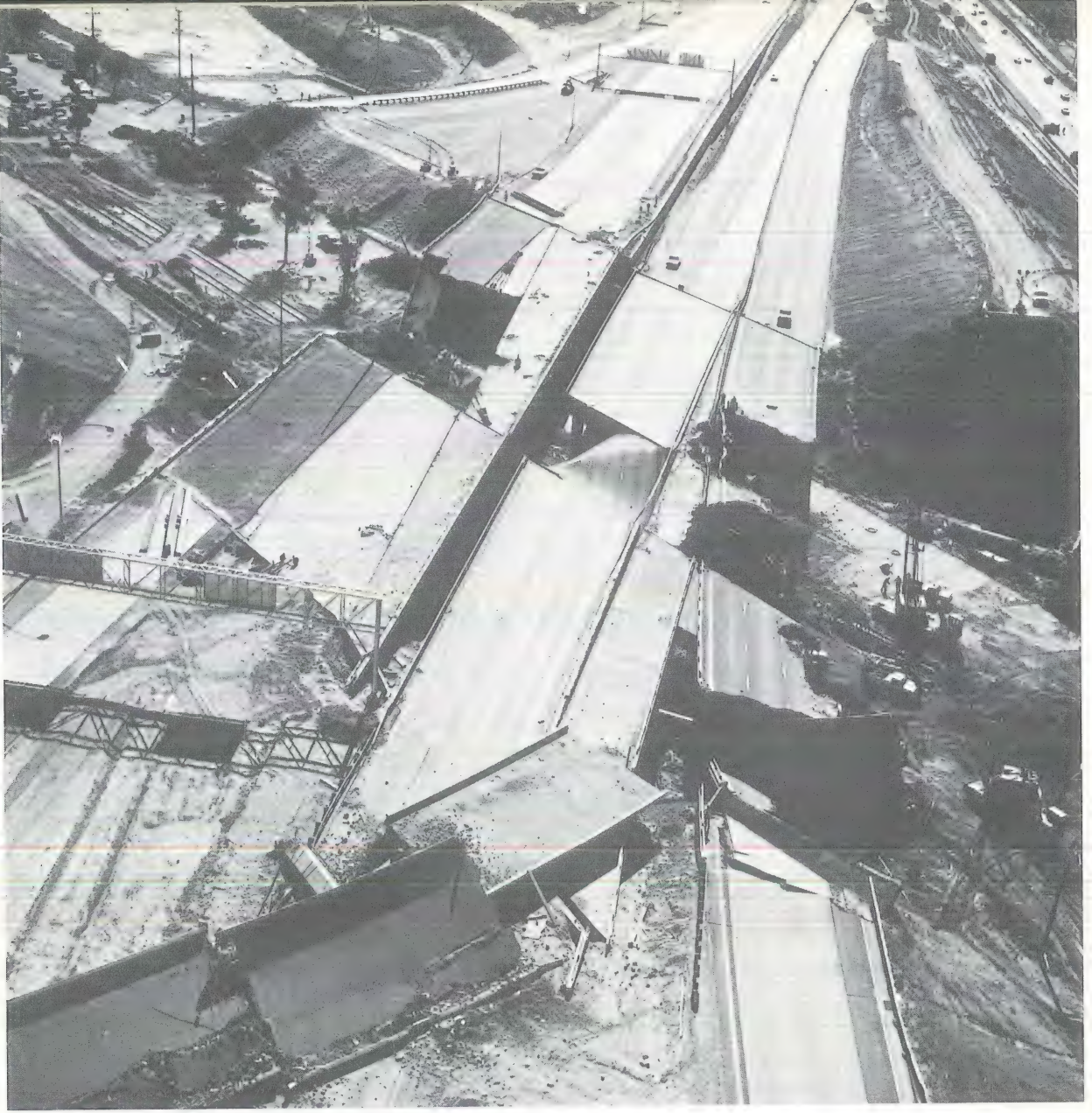
منظر للانزلاق الأرضي بمرتفعات تيرن أجين قرب أنكوراج، بعد الزلزال مباشرة.

ولذلك فانه من الممكن التنبؤ بالزلازل عن طريق الاستمرار في تتبع ميلان سطح الأرض وحركة الصدوع والنشاط الاهتزازي. وقد بدأت بعض شبكات التتبع هذه عملها في مناطق أخرى بالعالم.

ورغم عدم وجود طريقة مؤكدة حتى الآن للتنبؤ بالزلازل قبل حدوثها بقليل، إلا أن هناك عدداً من التنبؤات الناجحة قد تحققت فعلاً. ففي سنة 1966، قد تم التنبؤ بزلزال في مدينة طشقند بالاتحاد السوفياتي بتتبع غاز الرادون

قاع المحيط حيث يقل التشويش الاهتزازي، يخطط اليابانيون لتتبع موجات الاهتزاز الزلزالي (الموجات الأمامية) التي تسبق الزلزال الرئيسي. ومن المؤمل أن يتحقق بتتبع هذه الأنشطة الزلزالية الوصول الى نظام يكفل التنبؤ بدقة بالهزات الأرضية القادمة.

ففي ولاية كاليفورنيا، قد وجد أنه يسبق الزلازل المعتدلة رفع أو هبوط في الأرض وتغيير في الحركة لنطاقات الصدوع، من زحف بطيء الى توقف كامل في الحركة.



شكل 14 - 23

تحطم طريق معلق من جراء زلزال سان فرناندو 1971 .

مساء يوم بارد، أمكن انقاذ عشرات الآلاف من الأرواح. وقد أكد المراقبون التقارير التي وردت من الصين بأن حوالى 90 % من المباني بمدينة هاى شى قد لحقها ضرر بالغ. فالموجات الأمامية التى سبقت هذا الزلزال قد ساعدت على التنبؤ به وقد دفعت السكان الى الامتثال للتحذيرات. ولسوء الحظ فقد تنبأ الصينيون بزلزال تانق شان القوى، ولكنهم لم يتمكنوا من تحديد تاريخ دقيق لوقوعه.

فى الآبار. والرادون هو غاز خامل ينتج عن التحلل الذرى للراديوم، الذى يوجد بمقادير نادرة فى بعض الصخور. وعادة ما يبقى هذا الغاز محبوسا داخل الصخور ولكن بعد تراكم الضغط فيها تسمح التشققات الناشئة بهروبه. ففى الشهر الثانى من عام 1975 أمكن التنبؤ بزلزال فى شمال شرق الصين قبل ساعات فقط من وقوعه. وإعلان حالة الطوارئ بين حوالى 3 مليون نسمة للبقاء خارج منازلهم فى

الصخور فوق سطح الصدع. وعندما أوقف الضخ لمدة سنة، لوحظ تناقص في النشاط الزلزالي، وبعد استئناف الضخ مرة أخرى زاد تكرار الهزات الأرضية زيادة ملحوظة.

وقد وقعت زلازل أخرى بسبب نشاط الانسان في مناطق مجاورة لبحيرات السدود. فمثلا منذ امتلاء بحيرة ميد على حدود ولايتي أريزونا ونيفاذا في سنة 1936 تم تسجيل مئات من الهزات الخفيفة. ويعتقد بأن سبب الزلازل هو الماء المضاف للمياه البحيرة وربما ساعد في ذلك تأثير التسليك أيضا للمياه المتسربة الى الصخور تحت البحيرة. كما يعتقد بأن خزاناً آخر كان سبباً في احداث زلازل مدمر في الهند مات بسببه 200 شخص. كما أن التفجيرات النووية تحت الأرض تحدث عددا من الهزات التلوية التي لم يصل أى واحد منها الى حجم الانفجار الذى سببها.

ويأمل كثير من العلماء أن يتوصلوا في يوم ما الى التقليل من أخطار الزلازل عن طريق احداث عدد من الهزات الصغيرة باستعمال ضخ السوائل أو التفجيرات النووية. فمثل هذه الطرق سوف تطلق الضغط المحبوس ببطء مستمر والذي قد يتراكم في حالة عدم اطلاقه لينطلق على هيئة زلازل قوى. وتذكر دائما أنه يتطلب الأمر اطلاق عدة آلاف من الهزات الصغيرة لتعادل الطاقة المنطلقة من زلزال واحد قوى.

وبالإضافة الى وقوع كثير من مناطق الصدوع في غير متناول الانسان، فإن هذه الحقيقة تجعل من احتمال التحكم في الزلازل أمراً غير ممكن كما قد يبدو لأول وهلة. ومن الحالات المناسبة للتحكم في الزلازل وجود بؤر الزلازل في أعماق ضحلة بولاية كاليفورنيا مما يسهل من عمليات الحفر. ولا بد أن تجرى عدة اختبارات في مناطق نائية قبل أن نجرؤ على المخاطرة باستعمال هذه الطريقة على امتداد شبكة الصدوع مثل فالتو سان اندرياس أو على الأقل في المناطق المكتظة بالسكان.

فاعلان حالة الطوارئ لزمّن طويل بأن هناك زلزال قادم لم تكن من الدقة بحيث تنقذ ما قدر بحوالى 650,000 نسمة فقدوا حياتهم و780,000 نسمة اصابوا بجراح. كما حدثت في الصين أيضا تحذيرات خاطئة. ففي منطقة هونج كونج، أخلى الناس مساكنهم لمدة زادت عن شهر ولم يحدث أى زلزال. فالحوار الذى يسبق أمر اخلاء مدينة كبيرة مثل لوس أنجلوس لا بد أن يكون طويلا. اذ لا بد من الأخذ في عين الاعتبار تكاليف الاخلاء ووقت العمل الضائع ومشاكل أخرى عديدة لها علاقة بالاخلاء ثم موازنتها بالاحتمال المتوقع للزلزال. فلا بد أن يصبح التنبؤ بالزلازل علما معتمدا قبل أن تصدر هذه التحذيرات.

أما عملية التحكم في وقوع الزلازل فهو أمر آخر مختلف تماما. وما اعطى العلماء بعض التشجيع ما تم اكتشافه من أن الانسان قد تسبب فعلا في حدوث بعض الزلازل. وقد أتى الدليل المقنع عن احداث الزلازل بفعل الانسان في الفترة ما بين 1962 و 1966 عندما درس النشاط الزلزالي للمحطة الكيميائية لصناعة الأسلحة بجمال الروكى قرب مدينة دنفر. فلم تسجل مصلحة مسح الأراضي والسواحل أى نشاط زلزالي في مدينة دنفر لمدة 80 عاما قبل سنة 1962. وفي تلك السنة بدأت المحطة الكيميائية في ضخ النفايات الناتجة عن انتاج المواد الكيميائية الحربية في بئر يبلغ عمقها 3600 متر. ففي الفترة المصاحبة لضخ النفايات من شهر 4 / 1962 إلى شهر 9 / 1965، أمكن تسجيل 700 هزة أرضية خفيفة من بينها 75 كانت من القوة بحيث شعر الناس بها. فقد تسبب ضخ المياه تحت ضغط في تسليك الصدع الذى كان يتراكم فيه تأثير الضغط خلال فترة زمنية. وليس التأثير المسكوك هو الذى يجعل الصخور عبر الصدع زلقة، ولكن الماء يضغط بقوة الى الخارج في اتجاه عمودى على سطح الصدع. وتعمل هذه القوة في اتجاه معاكس للقوة الطبيعية التى تعمل الى الداخل، والتى تنتج عن وزن

أسئلة

للمراجعة :

- 1 - ما هو الزلزال؟ وتحت أى الظروف تقع الزلازل؟
- 2 - ما هى العلاقة بين الصدوع والبؤر والمراكز السطحية للزلازل؟
- 3 - تقع الزلازل فقط فى الغلاف الصخرى المتصلب ولا تقع فى الغلاف الوهن اللدن. اشرح هذه الظاهرة باستعمال فكرة الارتداد المرن.
- 4 - قد تعتبر الصدوع التى لا يعترىها زحف نشطاً مأمونة، فند أو عزز هذه الجملة.
- 5 - صف المبدأ الذى اسست عليه المرجفة.
- 6 - ميز بين حركة الموجات الأولية (و) وحركة الموجات الثانوية (ث)؟
- 7 - تنتقل الموجات الأولية (و) خلال الأجسام الصلبة والسائلة والغازية، بينما تنتقل الموجات الثانوية (ث) خلال الأجسام الصلبة فقط. إشرح ذلك.
- 8 - باستعمال شكل 13-14، حدد المسافة بين زلزال ومحطة رصده، اذا وصلت أول موجة ثانوية (ث) بعد 3 دقائق من وصول أول موجة أولية (و).
- 9 - رغم أن مقياس ميركالى لشدة الزلازل هو أكثر دقة من المحاولات السابقة لوصف الشدة إلا أن له عيوباً، صف باختصار هذه العيوب.
- 10 - ما هو الفرق بين مقدار وشدة الزلزال؟
- 11 - لكل زيادة مقدارها واحد صحيح على مقياس ريختر يزداد المقدار بمعدل مرات.
- 12 - تزيد الطاقة المنطلقة من زلزال مقداره 7 على مقياس ريختر بـ ضعفاً عن زلزال مقداره 6.
- 13 - عدد ثلاثة عوامل تؤثر فى مقدار الدمار الذى تسببه الموجات الاهتزازية؟
- 14 - بالإضافة الى الدمار الذى يحدث مباشرة بواسطة الموجات الاهتزازية، عدد ثلاثة أنواع أخرى من أسباب الدمار المصاحب للزلازل.
- 15 - كيف يمكن التحكم فى الزلازل مستقبلاً؟

الكلمات الدالة :

fault	صدع	elastic rebound	ارتداد مرن
epicenter	مركز سطحي	focus	بؤرة
seismograph	مرجفة	shallow focus	بؤرة ضحلة
magnitude	مقدار	deep focus	بؤرة عميقة
richer scale	مقياس ريختر	intermediate focus	بؤرة متوسطة
mercalli intensity scale	مقياس الشدة لميركالي	tsunami	تسونامي
primary wave	موجة أولية	foreshock	رجات أمامية
secondary wave	موجة ثانوية	after shock	رجات تلوية
surface wave	موجة سطحية	earthquake	زلزال
long wave	موجة طويلة	seismogram	سجل مرجفة
body wave	موجة عميقة	seiche	سيتشي
medium wave	موجة متوسطة		
inertia	قصور ذاتي		
benioff zone	نطاق بينيوف		

15



باطن الأرض

15



النوعية. وعندما تمر الموجات الاهتزازية بالأرض فانها تنقل معلومات عن المواد التي تنتقل خلالها الى سطح الأرض، ولهذا فانه بالتحليل الدقيق، تعطى الموجات الاهتزازية ما يشبه صورة الأشعة السينية لنطاقات الأرض.

سبر أعماق الأرض

إن الكثير مما نعرفه عن أعماق الأرض يأتي من دراسة الموجات الأولية (و) أى الموجات التضاغطية والموجات الثانوية (ث) أى الموجات القاصة، التي تخترق نطاقات الأرض وتظهر عند نقطة بعيدة عن مصدرها. وبتعبير بسيط، فان هذه الطريقة تعتمد على القياس الدقيق للزمن اللازم لانتقال الموجات الاهتزازية من موقع زلزال أو انفجار نووى الى محطة رصد زلزالي. وحيث أن الزمن اللازم لانتقال موجات (و) وموجات (ث) عبر الأرض يعتمد على خواص المواد الصخرية التي تعترض طريقها، فان علماء الزلازل يبحثون عن مقدار التفاوت في زمن الانتقال الذي لا يمكن أن يعزى الى الفروق في المسافات المقطوعة. اذ تتناسب هذه الفروق مع الاختلاف في خواص الصخور.

وقد تساعد المقارنة البسيطة على توضيح هذه الطريقة المتبعة لسبر أعماق الأرض. ولهذا الغرض، نفرض أنك تسافر على نفس الطريق كل صباح الى نقطة معينة. وتستغرق هذه الرحلة نفس الفترة الزمنية كل يوم من أيام الأسبوع ما عدا يوم الجمعة التي تستغرق يومها مدة أطول بعدة دقائق. وقد كلف شخص آخر بتحديد الزمن الذي تستغرقه رحلتك اليومية (دون أن يتبعك) ومعرفة سبب الزمن الزائد في رحلة يوم الجمعة. وهل تتوقف في مواقع معينة أو هل هناك شيء ما يؤخرك يوم الجمعة دون الأيام الأخرى. فلا بد أن يفسر علماء الزلازل التفاوت المشابه في زمن الانتقال. وحيث أن الأرض ليست جسما متجانسا التركيب، فانه يحدث تفاوت في أزمنة الانتقال لأن الموجات المنتقلة عبر نطاقات الأرض تعترض طريقها فروق في طبيعة المواد باختلاف أعماقها.

واحدى المشاكل الهامة هي أنه للحصول على أزمنة انتقال دقيقة لا بد من تعيين الموقع الصحيح والزمن للحدث

سبر أعماق الأرض
- طبيعة الموجات الاهتزازية
- اكتشاف التركيب الداخلى للأرض

القشرة الأرضية

الوشاح اللب

بالرغم من أن مكونات جوف الأرض ليست بعيدة عن موطئ أقدامنا فإن خضوعها للملاحظة المباشرة يعتبر محدودا جدا. فمثلا عندما نقارن مجهوداتنا المبذولة لسبر أعماق الأرض عن طريق الحفر، بما أنجزناه في مجال الفضاء فان هذه الحقيقة تبدو جلية. وحسب برامج اكتشاف النظام الشمسى، فان تكاليف المركبات الفضائية الأخيرة المستكشفة لكوكب زحل تساوى تكاليف حفر بئر واحدة عمقها حوالى 1600 كيلومتر في صلب الأرض. وهذا العمق يفوق بكثير التسع كيلومترات التي أمكن حفرها حتى الآن. ورغم انه يمكن اعتبار النشاط البركانى نافذة نطل بها على جوف الأرض، لأن المواد تصعد من أسفل، فان هذا النشاط لا يسمح إلا باطلاع محدود للمائتى كيلومتر الخارجية لكوكبنا. وهذا لا يشكل إلا جزءاً صغيراً من نصف قطر الأرض البالغ 6370 كيلومترا.

ولحسن الحظ تعلم الجيولوجيون الكثير عن تركيب الأرض عن طريق أبحاث الفضاء وبواسطة التجارب العملية للصخور تحت ضغط عال ومن العينات القادمة من الكواكب المكونة للنظام الشمسى والنيازك التي كثيرا ما ترتطم بسطح الأرض. والأهم من ذلك فانه أمكن الحصول على دلائل عن الخواص الطبيعية داخل كوكبنا عن طريق دراسة الموجات الاهتزازية التي تولدها الزلازل والتفجيرات

تستعمل الموجات الاهتزازية لاستكشاف النطاقات العميقة تحت سطح الأرض

1 - تتوقف سرعة الموجات الاهتزازية على كثافة ومرونة المواد التي تخترقها. حيث تنتقل الموجات الاهتزازية أسرع خلال المواد الصماء والتي تعود بمرونة كافية الى وضعها الأصلي، بعد إزالة الأثر عليها. فمثلا تعمل كتلة من الصخور البلورية على نقل الموجات الاهتزازية بسرعة أكبر من طبقة من المواد غير المتناسكة.

2 - وخلال الطبقة الواحدة، تزداد سرعة الموجات الاهتزازية عادة بازدياد العمق لأن ازدياد الضغط يعمل على كبس الصخور الى مادة أكثر تماسكا ومرونة.

3 - الموجات الأولية (و) أى الانضغاطية والتي تتأرجح الى الأمام وإلى الوراء في نفس الاتجاه الذي تنتقل فيه، تستطيع اختراق الأجسام الصلبة وكذلك السوائل، لأن هذه المواد تتصرف بمرونة عندما يعثرها التضاضط وهذا يعنى أنها ترجع الى شكلها الأصلي بمجرد رفع الضغط عنها (شكل 15 - 2 أ). أما الموجات الثانوية (ث) أى القاصة والتي تتأرجح في اتجاه عمودى على اتجاه حركتها، فانها لا تستطيع الانتقال عبر السوائل لأن السوائل لا تتحمل الموجات القاصة وهى في ذلك تختلف عن الأجسام الصلبة (شكل 15 - 2 ب). وهذا يعنى أن السوائل تتدفق ببساطة عندما تتعرض لقوة تعمل على تغيير شكلها.

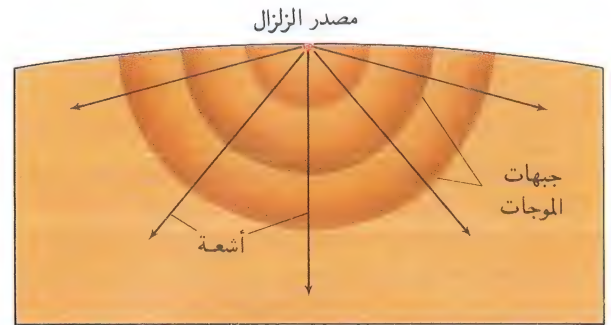
4 - تنتقل موجات (و) اسرع من انتقال موجات (ث) في جميع المواد.

5 - عند مرور الموجات الاهتزازية من مادة الى أخرى فان طاقة الموجات تنكسر (تنحني). هذا بالإضافة الى أن بعض الطاقة ينعكس عند الحد الفاصل بين المادتين المختلفتين . وهذا يشبه ما يحدث للضوء عند مروره من الهواء الى الماء. ولهذا فان ذلك يتوقف على طبيعة الطبقات التي تعترض طريق الموجات الاهتزازية. فهى إما أن تزداد سرعتها أو تتباطأ أو تنحني أو

الاهتزازى. وبالنسبة للزلازل فانه لا يمكن الحصول على هذه المعلومات إلا من الموجات الاهتزازية نفسها. وذلك يجعل قياسها غير مؤكد. وعلى عكس ذلك، تمتاز التفجيرات النووية على الزلازل بكون الزمن الصحيح والمسافة معلومين. ولكن رغم محدودية الاستفادة من دراسة الموجات الاهتزازية الناشئة عن الزلازل، فان علماء الزلازل قد تمكنوا خلال النصف الأول من هذا القرن، من تحديد النطاقات الأساسية للأرض. ولكن لم يتم التأكد من رسم التركيبات الدقيقة للأرض إلا بعد مطلع ستينات القرن العشرين، وذلك عندما بلغت التجارب النووية أوجها وبعدما تم نصب شبكات تحتوى على مئات من المراصف الحساسة.

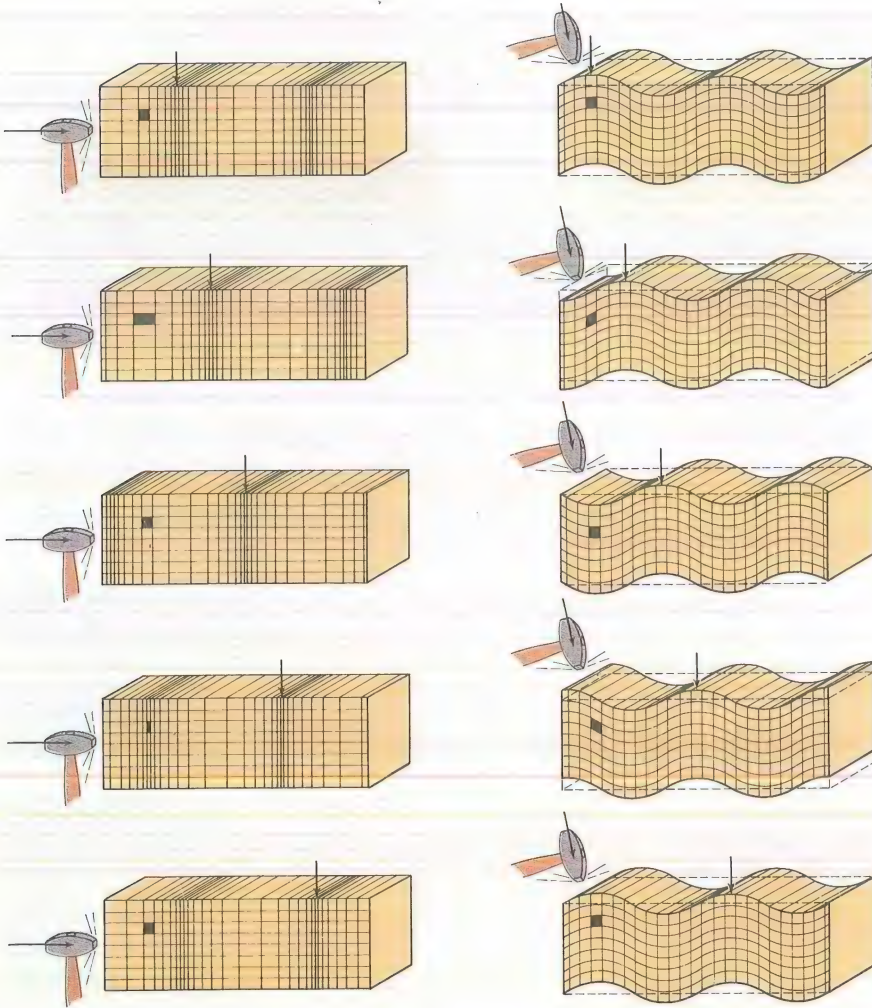
طبيعة الموجات الاهتزازية

لفحص ماهية الأرض وتركيباتها، فانه لا بد من دراسة بعض الخواص الأساسية لنقل وتولد الموجات. وكما ذكر في الفصل السابق، فان الموجات الاهتزازية تنتقل من مصدرها في جميع الاتجاهات على هيئة جبهة الموجة. ومن المتبع لأغراض الايضاح أن ترسم المسارات التي تأخذها الموجات على هيئة أشعة أو خطوط مرسومة في اتجاهات عمودية على مقدمة الموجات كما هو موضح في شكل 15 - 1. ومن الخصائص الهامة للموجات الاهتزازية ما يلي:



شكل 15 - 1

تنتقل الموجات الاهتزازية في جميع الاتجاهات من المصدر الزلزالي (البؤرة) في صورة جبهات للموجات ويمكن تمثيل اتجاه الحركة بخطوط شعاعية وهى خطوط ترسم متعامدة مع جبهات الموجات.



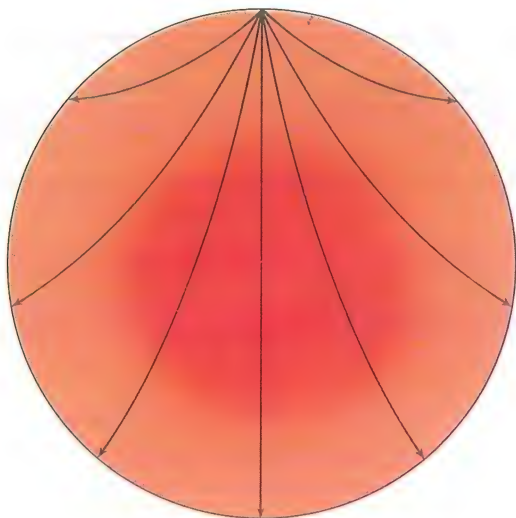
شكل 15 - 2

انتقال الموجات الأولية (و)
والموجات الثانوية (ث) عبر مادة
صلبة.

(أ) - بسبب مرور الموجات الأولية
تناوب عمليتي التضغط والارتخاء
عبر المواد التي تخترقها الموجات.
(ب) - أما مرور الموجات الثانوية
فيسبب تغيرا في الشكل دون تأثير
في الحجم للمواد المخترقة. ونظرا
لأن السوائل تتصرف بمرونة عند
تعرضها للتضاغط يعنى انها ترجع
الى سابق وضعها عند رفع الضغط
عنها فهي تنقل الموجات الأولية
(و) وحيث ان السوائل لا تقاوم
التغير في الشكل فلا يمكن
للموجات الثانوية ان تنتقل
خلالها.

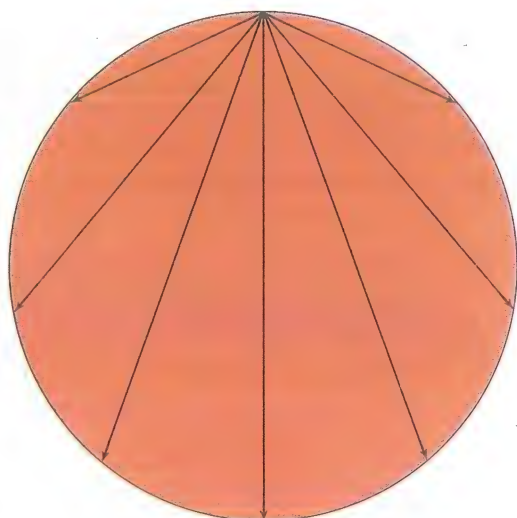
من الموجات المسجلة قرب هذه المراصد. وكما ذكر آنفا، فإن
الزيادة العامة في السرعة المصاحبة لزيادة العمق هي ناتجة
عن زيادة الضغط الذي يعمل على تقوية الخصائص المرنة
للمصخور الواقعة تحت أعماق كبيرة. ونتيجة لذلك فإن
مسارات الموجات عبر الأرض تنكسر (تنحني) كما هو موضح
في شكل 15 - 4. وعندما تم تطوير مراجف أكثر حساسية،
اتضح من خلالها أنه إلى جانب التغيرات التدريجية في
السرعة هناك تغيرات فجائية عند أعماق معينة. وحيث أن
عدم الاستمرارية قد سجلت في جميع مناطق العالم، فقد

تتوقف نهائيا في بعض الأحيان. وتساعد هذه
التغيرات، الخاضعة للملاحظة الخاصة بحركة الموجات
الزلزالية، علماء الزلازل على سبر أعماق الأرض.
ولو كانت الأرض كتلة متجانسة تماما لانتشرت
الموجات الزلزالية في جميع الاتجاهات كما في شكل 15 - 3.
وتنتقل الموجات الزلزالية المارة عبر مثل هذا الكوكب
النموذجي في خطوط مستقيمة بسرعة ثابتة. ولكن الحال ليس
كذلك بالنسبة للأرض. فالواقع فعلا أن الموجات الزلزالية
الواصلت إلى مراصد بعيدة من موقع زلزال ما تنتقل أسرع



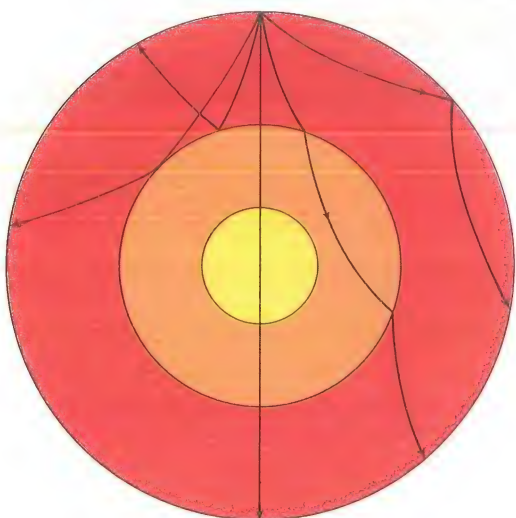
شكل 15 - 4

مسارات الموجات الاهتزازية عبر كوكب تزداد فيه السرعة بازدياد العمق



شكل 15 - 3

تنتقل الموجات الاهتزازية عبر كوكب متجانس الخواص في مسارات مستقيمة وبسرعة منتظمة.



شكل 15 - 5

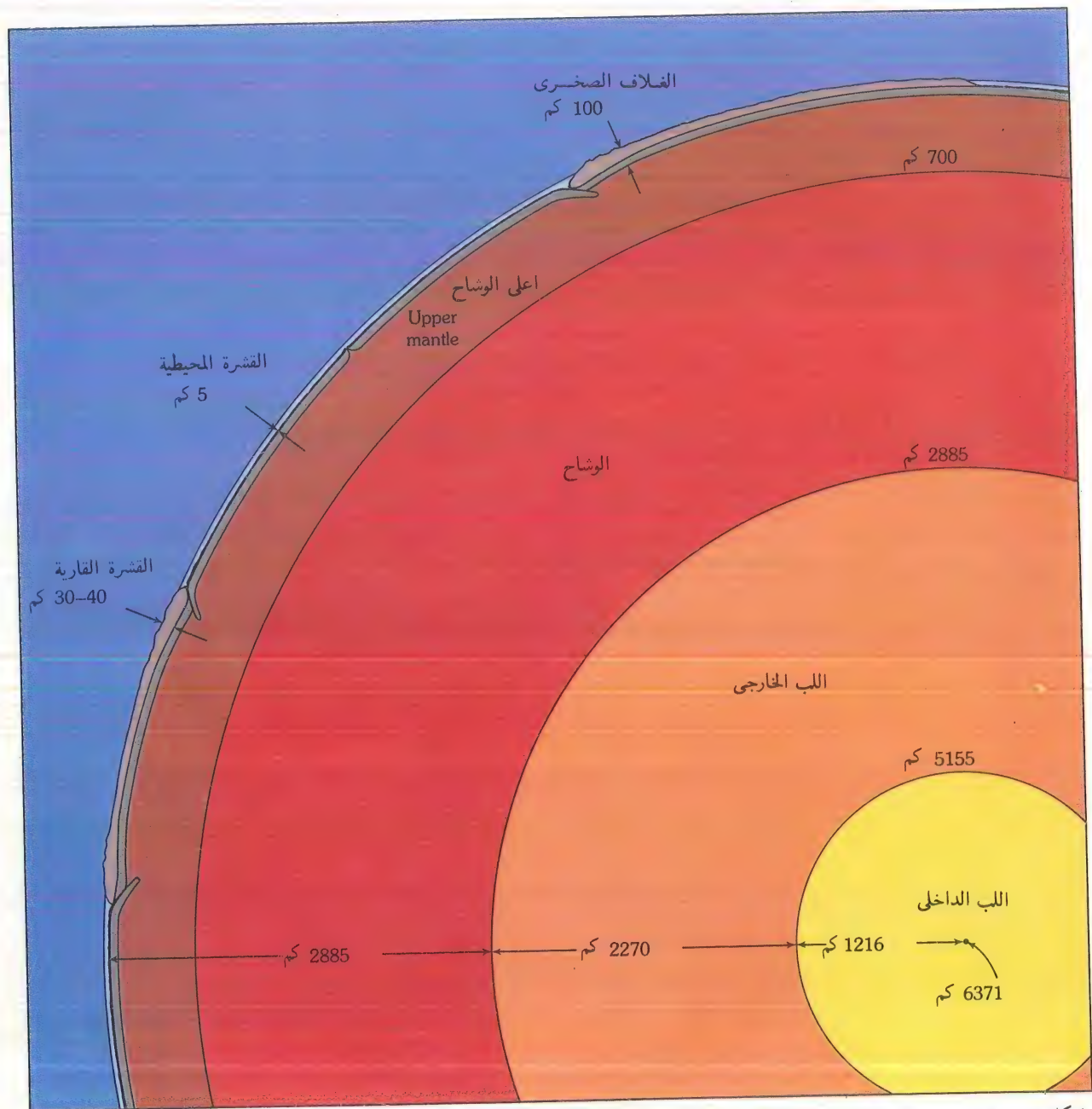
بعض المسارات المحتملة للأشعة الاهتزازية عبر الأرض.

المعملية التي تحدد بالتجربة خصائص المواد المختلفة للأرض الواقعة تحت ظروف بيئية متطرفة في أعماق الأرض.

وبناء على هذه المعلومات الاهتزازية تقسم الأرض الى أربعة نطاقات أساسية: (1) القشرة، وهي نطاق خارجي رقيق جداً و (2) الوشاح، وهو نطاق صخري يقع تحت

استنتج علماء الزلازل من ذلك أن الأرض مكونة من نطاقات مميزة أو أغلفة ذات محتوى وتركيب مختلفين (شكل 15 - 5). ويعتقد بأن اختلاف تركيب النطاقات قد حدث خلال فترة مبكرة في تاريخ الأرض عندما كانت منصهرة تماماً. فخلال هذه الفترة غاصت المواد الثقيلة بينما طفت المواد الخفيفة الى أعلى. ومن ناحية أخرى فإن التركيب النطاقي يمثل مواد هي من نفس التركيب ولكنها مرت بتغير في أطوارها. ويحدث التغير في الطور عندما تنصهر الصخور أو تقترب من درجة الانصهار، أو عندما يتشكل تركيب الذرات المكونة للمعادن في هيئة هيكل بلوري أكثر ترابصاً استجابة الى الضغط الهائل في أعماق الأرض.

هذا وقد استمر تصنيف وتحليل المعلومات الزلزالية المجمعة من عدة مراصد لعدة سنوات. ومن هذه المعلومات طور علماء الزلازل خلال الخمسة وسبعين سنة الماضية، تصورا تفصيليا عن أعماق الأرض، (شكل 15 - 6). ويستمر الخبراء في مراجعة وتدقيق هذا النموذج كلما توافرت معلومات أكثر وكلما استعملت طرق اهتزازية حديثة. وعلاوة على ذلك، يضاف الى هذه المعلومات نتائج الدراسات

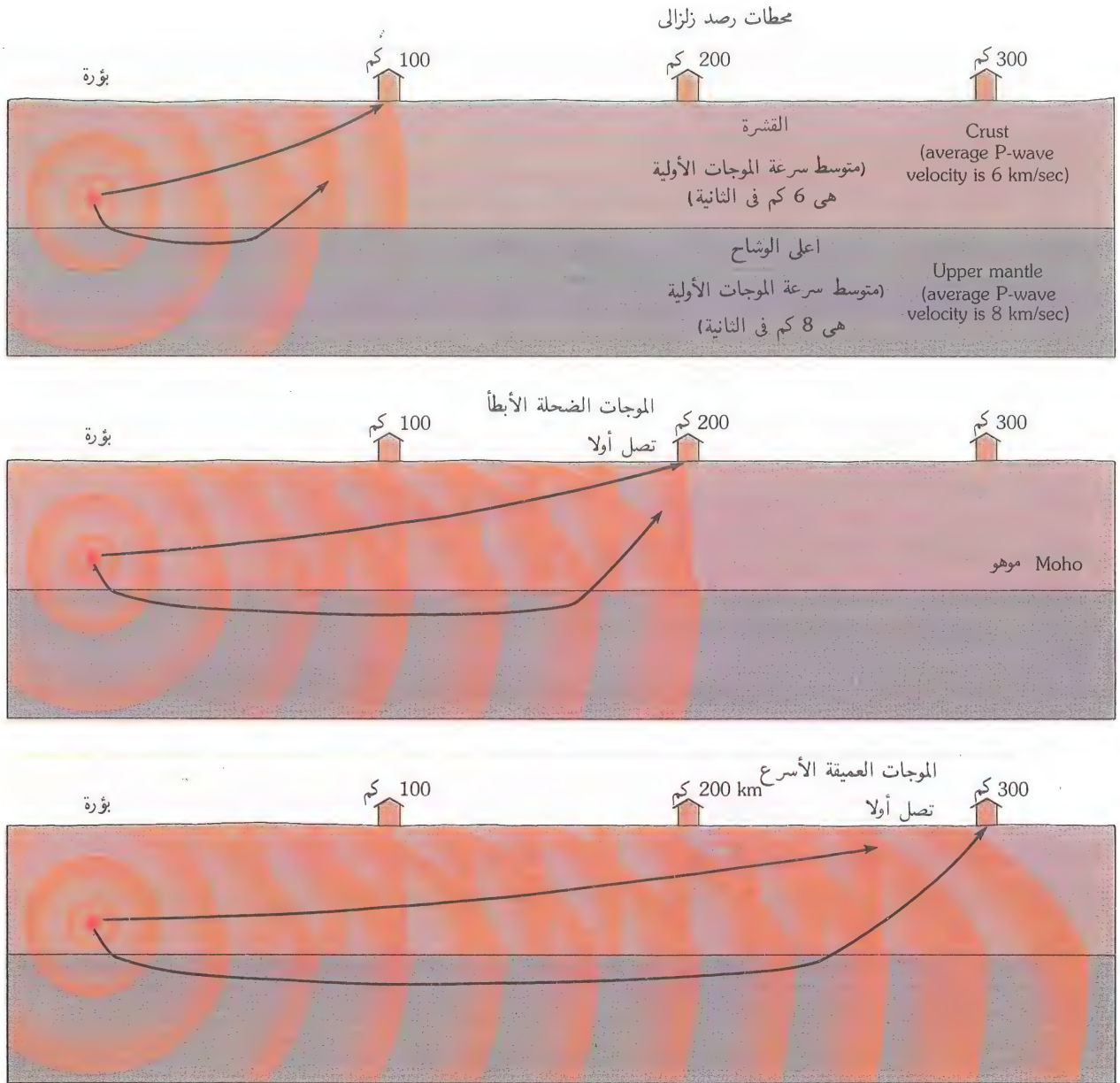


شكل 15 - 6

قطاع عرضي للأرض يوضح تركيبها الداخلي

معدينية صلبة يبلغ نصف قطرها 1216 كيلومترا. وكما سنرى فان هناك ملامح أخرى هامة قد اكتشفت داخل هذه المناطق.

القشرة ويبلغ سمكه حدا أقصى مقداره 2885 كيلومتر (3) اللب الخارجي، وهو نطاق يبلغ سمكه 2270 كيلومترا وله خصائص السائل المتحرك و(4) اللب الداخلي، وهو كرة



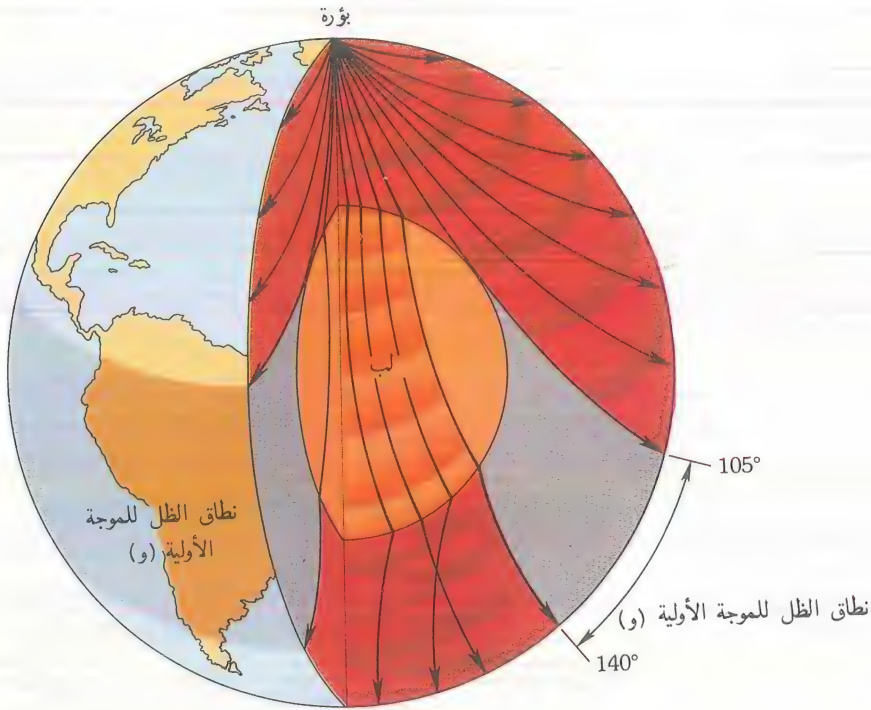
شكل 15 - 7

مسارات نموذجية للموجات الاهتزازية عند انتقالها من بؤرة الزلزال الى ثلاثة محطات لتسجيل الزلازل. تستقبل المحطتين القريبتين الموجات البطيئة أولاً لأن مسافة الانتقال قريبة. أما اذا كانت المسافة ابعد من 200 كيلومتر فان الموجات السريعة هي التي تصل أولاً حيث انها تنتقل بسرعة عبر الوشاح.

الأرض. ويفصل النطاق الذي اكتشفه بين صخور القشرة الأرضية وصخور أخرى ذات تركيب مختلف في الوشاح الذي يقع أسفلها. وقد سُمّي هذا الحد بالفاصل الموهوروفيشي تخليداً له. ولأسباب معروفة اختصر هذا الاسم الى موهو.

اكتشاف التركيب الداخلي للأرض

في سنة 1909، قدم رائد علم الزلازل اليوغوسلافي اندريا موهوروفيشك؛ أول دليل مقنع لوجود نطاقات داخل



شكل 15 - 8

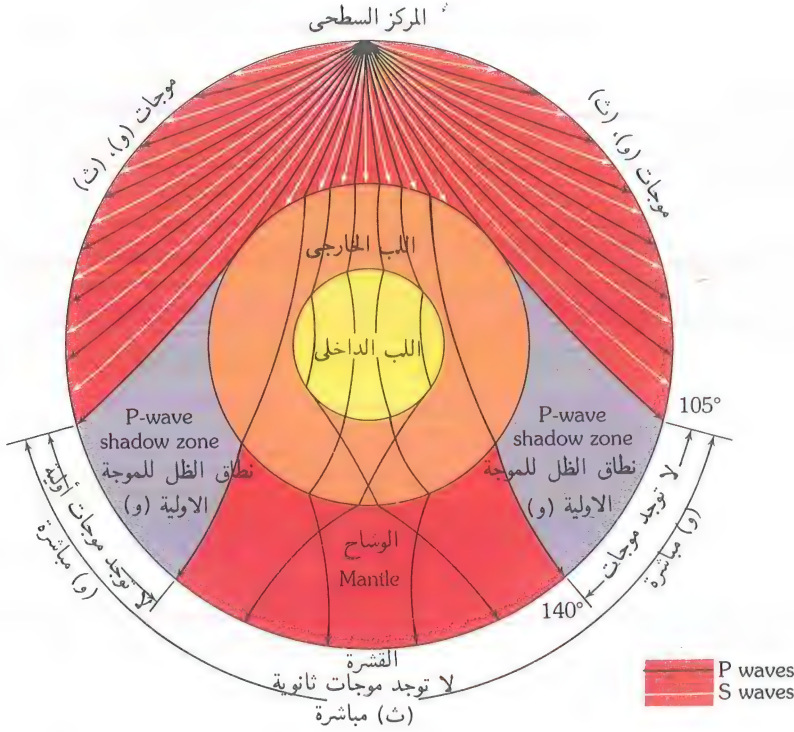
يعمل التغير المفاجيء للخواص الطبيعية عند الحد الفاصل بين الوشاح واللب على الانحناء الشديد لمسارات الموجات الزلزالية، ونتيجة لهذا الانحناء المفاجيء لاتجاه الموجات تنشأ منطقة ظل للموجات الأولية بزاوية تتراوح بين 105 و 140 درجة.

بعد 300 كيلومتر من المركز السطحي، فإن أول موجة من نوع (و) وصلت بعد أن دخلت وانتقلت خلال الوشاح (نطاق السرعة الأعلى). ولذلك رغم انتقال هذه الموجة مسافة أكبر فأنها قد وصلت محطة التسجيل في فترة زمنية أقصر من أى مسار آخر مباشر لأنها قطعت شوطاً أكبر من رحلتها عبر منطقة ذات تركيب مختلف. وهذا المبدأ هو مشابه تماماً لسائق سيارة في الطريق الدائري حول مدينة كبيرة خلال ساعات الازدحام. فرغم أن هذا الطريق أطول إلا أنه قد يكون أسرع.

وقد اكتشف عالم الزلازل الألماني بينو جوتنبرج بعد سنوات قليلة فاصلاً آخر أساسياً. وقد كان السبب في اكتشاف هذا الفاصل هو ملاحظة ضعف موجات (و) ثم اختفائها تماماً عند زاوية 105° من موقع زلزالى ثم ظهورها مرة أخرى عند حوالى 140° من موقع الزلزال نفسه، بعد مرور دقيقتين تقريباً من موعدها الذى يجب أن تظهر عنده حسب المسافة المقطوعة. ويبلغ عرض هذا الحزام الذى تختفى فيه الموجات الزلزالية المباشرة حوالى 35 كم اطلق

وبالفحص الدقيق للسجلات الاهتزازية للزلازل الضحلة وجد موهوروفيشك أن مرصد الزلازل الواقعة على مسافات أبعد من 200 كيلومتر من زلزال ما قد سجلت متوسط سرعة انتقال للموجات الأولية أكبر من محطات التسجيل الواقعة قرب الزلزال. وبصفة خاصة فإن الموجات الأولية (و) الواصلة الى محطة التسجيل الأقرب أولاً، كان متوسط سرعتها حوالى 6 كيلومترات في الثانية. وبالمقارنة فإن الطاقة الاهتزازية المسجلة عند المحطات البعيدة تنتقل بسرعة تقارب 8 كيلومترات في الثانية. فهذا التغير المفاجيء في السرعة لا يتناسب مع الوضع السائد الذى تم تسجيله من قبل. وقد استنتج موهوروفيشك من هذه المعلومات أن هناك نطاقاً يقع الى عمق 30 كيلومتراً له خصائص طبيعية تختلف عن القشرة الخارجية للأرض. ويوضح شكل 15 - 7 كيف وصل موهوروفيشك الى هذا الاستنتاج الهام. لاحظ أن أول مسار يصل الى محطة الرصد الواقعة على بعد 100 كيلومتر من المركز السطحي قد انتقل في أقصر طريق مباشرة عبر القشرة الأرضية. ولكن عند محطة الرصد الواقعة على

شكل 15 - 9



رسم تخطيطي للأرض يوضح مسارات الموجات الأولية (و) والموجات الثانوية (ث). أى منطقة تقع في اتجاه يزيد 105 درجات من المركز سوف لا تستقبل الموجات الثانوية المباشرة حيث انها لا تنتقل عبر اللب الخارجي. توجد منطقة ظل محدودة (من 105 الى 140 درجة) بالنسبة للموجات الأولية. وتنتج منطقة ظل الموجات الأولية هذه عن انحناء هذه الموجات عند مرورها من مواد الوشاح الأكثر صلابة الى مواد اللب الخارجي الأقل صلابة. وتزداد سرعة الموجات الاهتزازية التي تمر خلال مركز الأرض معبرة عن وجود اللب الداخلي للأرض.

عليه اسم نطاق الظل (شكل 15 - 8). ولقد استنتج جوتبرج أن بإمكانه تفسير نطاق الظل هذا إذا افترض أن الأرض بها لب مكون من مواد مختلفة في طبيعتها عن المواد التي في الوشاح وأن قطر هذا اللب يبلغ 3420 كيلومترا. فلا بد أن اللب قادر بشكل ما على منع انتقال الموجات نوع (و) وبطريقة مشابهة لحجب أشعة الضوء بواسطة جسم معتم والذي يكون ظلاً خلفه. ولكن، بدلا من منع انتقال الموجات، فإن منطقة الظل هذه تنشأ من انحناء الموجات نوع (و) عندما تدخل اللب كما يظهر في شكل 15 - 8.

وقد علم أيضا أن الموجات الثانوية (ث) لا تستطيع الانتقال عبر اللب ولذلك فقد استنتج الجيولوجيون بأن جزءاً من هذه المنطقة لا بد أن يكون سائلاً لا صلباً (شكل 15 - 9). وبما يدعم هذا الاستنتاج، أن سرعة الموجات الأولية (و) تتناقص بمقدار 40% عند دخولها الى اللب. وحيث أن الانصهار يقلل من مرونة الصخور، فإن جميع الأدلة تشير الى وجود نطاق سائل تحت الوشاح الصخري.

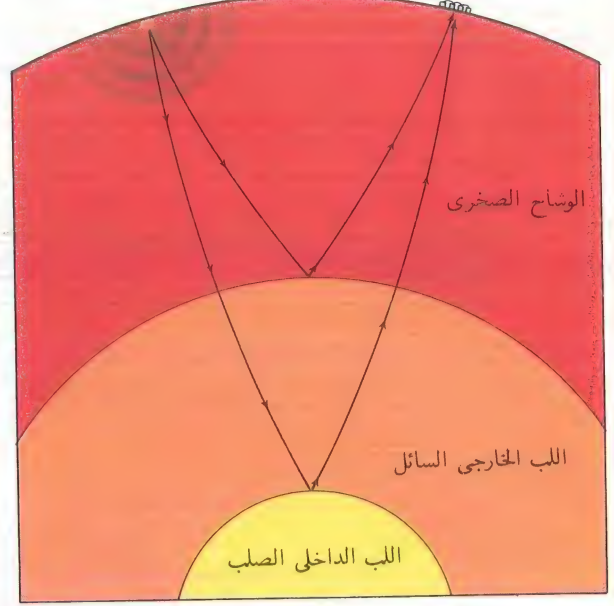
وفي سنة 1936، تم التنبؤ بالنطاق الأخير من نطاقات أعماق الأرض وذلك باكتشاف موجات اهتزازية يعتقد بأنها منعكسة من فاصل داخل اللب. وبذلك اكتشف اللب الداخلي للأرض. وقد كان من غير الممكن حساب الحجم الحقيقي لللب الداخلي للأرض حتى مطلع الستينات وذلك بعد اجراء التجارب النووية تحت الأرض.

ونظرا لمعرفة زمن ومكان التفجيرات النووية بدقة فإن صدى الموجات الزلزالية المنعكس من اللب الداخلي قد أمدنا بطريقة صحيحة لتحديد حجمه (شكل 15 - 10). وعن طريق هذه المعلومات والدراسات اللاحقة لها، فقد تم تحديد نصف قطر اللب الداخلي بحوالى 1216 كيلومترا. هذا بالإضافة الى أن الموجات الزلزالية نوع (و) المارة باللب الداخلي لها زمن انتقال أسرع من الموجات المارة باللب الخارجي. كما تعد الزيادة في مرونة اللب الداخلي دليلاً على الطبيعة الصلبة لهذه المنطقة الداخلية. وقد سمح التقدم الكبير في علم الزلازل وميكانيكية الصخور خلال الخمس

60 كيلومترا وبالمقارنة فان سمكها في الداخل المستقر للقارات يقرب من 30 كيلومترا.

ومن خلال دراسات سرعة الموجات الاهتزازية الأولية فقد تم لأول مرة معرفة بأن صخور قشرة الأحواض العميقة للمحيطات تختلف في تركيبها عن تلك التي في الألواح القارية. ويشير زمن انتقال موجات (و) الى أن سرعة 6 كيلومترات في الثانية تعتبر سرعة نموذجية بالنسبة لصخور القارات، بينما سجلت سرعة 7 كيلومترات في الثانية بالنسبة لصخور القشرة المحيطية. وقد أعدت تجارب معملية لتحديد أنواع مواد الأرض التي تحدث أزمته انتقال مشابهة تقريبا لتلك المسجلة لهذه النطاقات الصخرية. ومن هذه التجارب وكذلك من المشاهدة المباشرة، أمكن مقارنة متوسط تركيب الصخور القارية بالصخور النارية المعروفة (الجرانيت). وكما في الجرانيت، فمن المعتقد بأن القشرة القارية غنية بعناصر البوتاسيوم والصوديوم والسليكون وأن كثافتها تبلغ 2.8 ضعف كثافة الماء. ورغم أن هناك عدة صخور مقتحمة من الجرانيت وما يكافئها من المتحولة، مثل صخر الناييس، إلا أن تدفقات كبيرة من البازلت والسلاسل البركانية المكونة من الصخور الأنديسيتية هي أيضا وفيرة. ونتيجة لذلك هناك دلائل على أن متوسط تركيب القشرة القارية هو أكثر شبيها بالتركيب المتوسط مثل تركيب الانديسيت والديوريت منه بتركيب الجرانيت الصافي.

منظومة مراجف بولاية مونتانا تجربة انفجار نووى بولاية نياددا



شكل 15 - 10

استعملت أزمته العبور للموجات الاهتزازية الناشئة عن تفجيرات التجارب النووية في قياس عمق اللب الداخلى بدقة وقد استعمل صف من المراجف بولاية مونتانا في تسجيل الصدى المرتد عن حافة اللب الداخلى.

والعشرين سنة الماضية بتحسين كبير في الصورة العامة لجوف الأرض والتي تم شرحها آنفا.

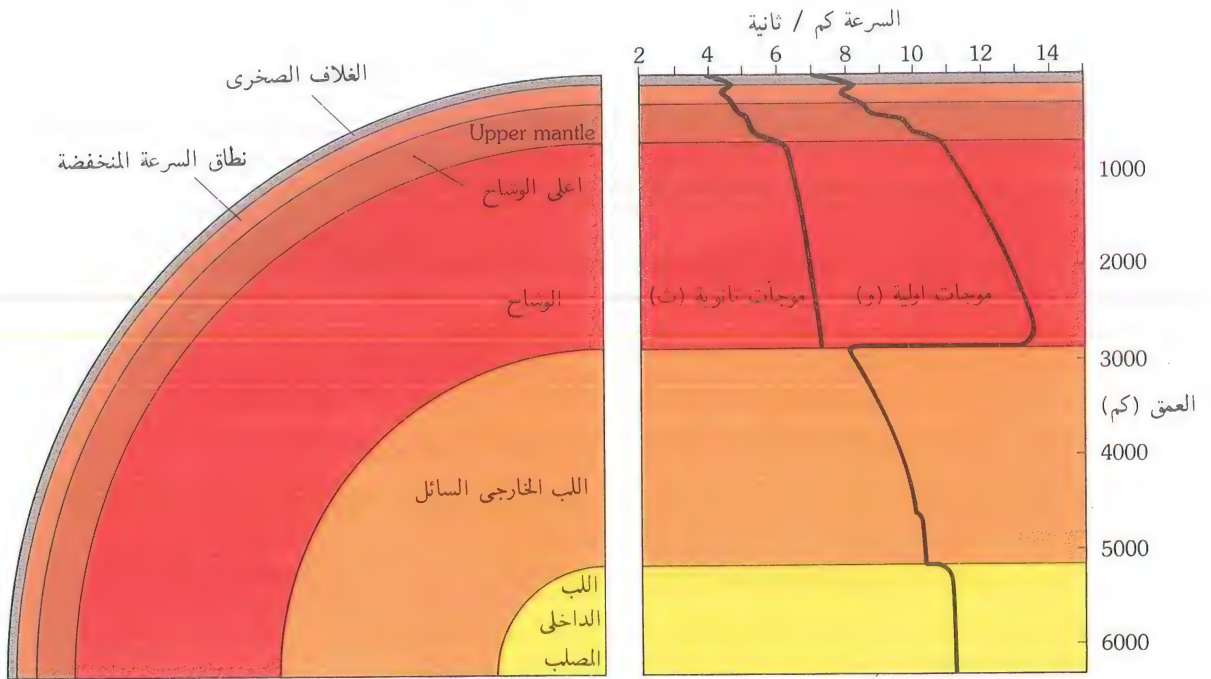
القشرة الأرضية

يصل سمك القشرة الأرضية في المتوسط الى أقل من 20 كيلومترا، مما يجعلها أقل سمكا من أى نطاق اكتشف حتى الآن. ولكن على امتداد هذا النطاق الرقيق هناك تفاوت في تركيب الصخور وفي سمكها. فبينما يبلغ سمك صخور القشرة الأرضية في الكتل القارية حوالى 35 كيلومترا، فان سمك القشرة المحيطية هو أقل بكثير إذ يبلغ في المتوسط 5 كيلومترات. وتصل القشرة الأرضية أكبر سمك لها في عدد من المناطق الجبلية المعروفة، إذ يزيد سمكها عن

وحتى عهد قريب لم يكن بوسع الجيولوجيين سوى التخمين بالنسبة لتركيب القشرة المحيطية العميقة التي تقع تحت عمق 4 كيلومترات من مياه البحار وعدة مئات من الأمتار من الرواسب. وبتطوير سفينة الحفر في المياه العميقة المسماة جلومر تشالنجر، أمكن الحصول على قوالب صخرية من قاع المحيطات (شكل 15 - 11). ومصادقا للتنبؤات فقد كانت العينات المتحصل عليها في غالبيتها من البازلت، وهي تختلف تماما عن الصخور المكونة للقارات. تذكر أنه من المعروف أن الانفجارات البركانية لمواد البازلت هي المسئولة



شكل 15 - 11
سفينة الأبحاث جلومار تशलنجر.



شكل 15 - 12

التغيرات في سرعة الموجات الأولية (و) والثانوية (ث) مع العمق. تحدد التغيرات الفجائية في متوسط سرعة الموجات الملامح الأساسية لأعماق الأرض. فعند عمق 100 كيلومتر يتناسب النقص الشديد في سرعة الموجات مع أعلى منطقة للسرعة المنخفضة. كما يوجد انحناءان في مسار السرعة في الجزء العلوي من الوشاح عند عمق 400 كيلومتر و 700 كيلومتر. ويعتقد بأن سبب هذا التفاوت هو أن المعادن تمر بتغيرات في الطور وليس مرد ذلك الفروق في التركيب المعدني. أما الانخفاض المفاجيء في سرعة الموجات الأولية وانعدام الموجات الثانوية عند عمق 2885 كيلومترا فهو يمثل الحد الفاصل بين اللب والوشاح. إذ لا يسمح اللب الخارجي السائل بانتقال الموجات الثانوية. كما أن الموجات الأولية تنتقل ببطء في هذا النطاق. وتزداد سرعة الموجات الأولية مرة أخرى عندما تدخل اللب الداخلي.

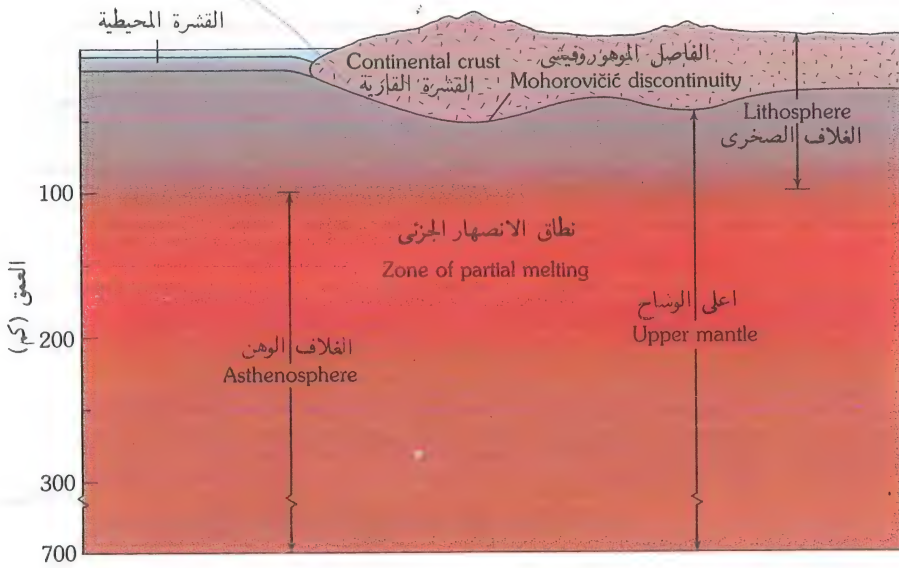
وإذا كان هذا صحيحا فكيف إذا ينقل الوشاح الصخري الموجات الثانوية (ث) التي لا تنتقل إلا عبر الأجسام الصلبة وفي نفس الوقت يتدفق كما لو كان سائلا؟ يمكن تفسير هذا التضارب الظاهري اذا كانت المواد تتصرف كما لو كانت صلبة تحت ظروف معينة وكما لو كانت سائلة تحت الظروف الأخرى. ويصف الجيولوجيون المواد التي من هذا النوع باللدونة وهذا يعنى أنه عندما تتعرض المادة لضغوط عابرة مثل تلك التي تنشأ عن الموجات الاهتزازية، فانها تتصرف كما لو كانت جسما لدنا وصلبا ولكن عند تعرضها لضغوط مستديمة (لمدة طويلة) فان نفس هذه المواد الصخرية سوف تتدفق. هذا يفسر قدرة الموجات الثانوية على اختراق الوشاح. ولكن هذا النطاق لا يمكنه أن يخزن في نفس الوقت الطاقة اللدنة مثل الجسم الهش ولذلك فهو ليس له القدرة على احداث الزلازل. وهذه الظاهرة غير العادية هي ليست بالطبع مقصورة على صخور الوشاح. فالمواد التي صنعها الانسان مثل عجينة طين الأطفال وعجينة الحلوى أيضا تمثل تصرفا لدنا. وعند قرع هذه المواد بواسطة مطرقة فانها تتهشم مثل المادة الهشة ولكن عندما تجذب ببطء فانها تتدفق بلدونة. ويجب أن لا يؤخذ عن هذه الأمثلة أن الأرض مكونة من مواد رخوة كالعجينة ولكنها مكونة من صخور صلبة حمراء ساخنة وتحت ضغوط عالية غير معروفة على سطح الأرض، وهي تظهر قدرة على التدفق.

وقد أكدت مجهودات حديثة لسبر الجزء العلوى من الوشاح التخمينات السابقة التي تدعى بوجود تقسيات أخرى. وأحد الأقسام الأكثر أهمية هو منطقة تقع بين عمقى 100 كيلومتر و 250 كيلومترا، تسمى نطاق السرعة المنخفضة. فعندما تخترق موجات (ث) وموجات (و) هذه المنطقة، تظهر نقصا ملحوظا في سرعتها (شكل 15 - 12). وأقرب الاحتمالات الذي يفسر البطء الملاحظ في الطاقة الاهتزازية هو وجود صخور منصهرة. ويعتقد بأن هذه المادة المنصهرة توجد في جيوب محددة كخليط بين صهارة وبلورات والتي لا يزيد مقدارها عن 10% من حجم المنطقة. ورغم

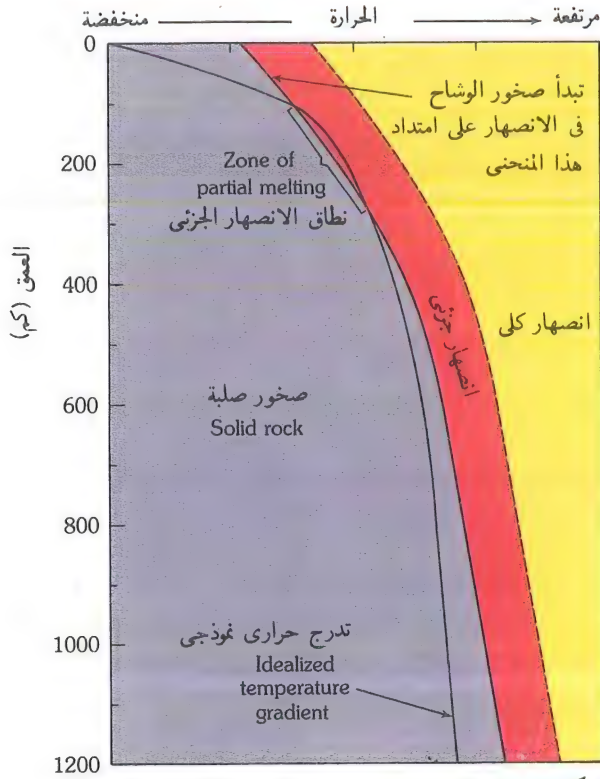
عن نشأة الجزر الواقعة داخل الأحواض العميقة للمحيطات.

الوشاح

يشكل الوشاح أكثر من 80% من حجم الكرة الأرضية وهو عبارة عن نطاق يبلغ سمكه 2885 كيلومترا من الصخور الممتدة من قاع القشرة (موهو) الى اللب الخارجى السائل. وتأتى معلوماتنا عن الوشاح من التجارب العملية ومن فحص المواد المقتحمة للقشرة من تحتها. وعلى الأخص تلك الصخور المكونة لأنابيب الكامبرليت التي يوجد فيها الماس عادة. ويعتقد بأنها تنشأ في أعماق تصل الى 200 كيلومتر. وهى جزء من داخل الوشاح. وتتكون صخور الكامبرليت هذه من البيريدوتيت وهو صخر يحتوى على السليكات الغنية بالحديد والمغنيسيوم. وهى أساسا عبارة عن معدنى الأوليفين والبيروكسين بالإضافة الى كميات أقل من الجارنيت. هذا ونظرا لأن الموجات الثانوية (ث) تنتقل بسهولة عبر الوشاح، فيصح الاستنتاج بأن الوشاح هو عبارة عن جسم صلب لدن ولذلك يوصف الوشاح بأنه نطاق صخري صلب. ويتركب جزؤه العلوى من معادن البيريدوتيت. وكما هو متوقع فان هذه الصورة عن الوشاح غير متكاملة. وأى نموذج عملى للوشاح لا بد أن يفسر توزيع الحرارة المقدره لهذا النطاق. وبينما تزداد درجة الحرارة بازدياد العمق في القشرة، فان هذا الاتجاه لا يستمر الى أسفل حتى الوشاح. ولكن زيادة الحرارة مع العمق عبر الوشاح هي أكثر تدرجا وهذا يعنى أن الوشاح له قدرة عملية على نقل الحرارة الى خارجه. إذ لو كانت الحرارة تنتقل في الوشاح عن طريق التوصيل كما هو الحال في القشرة لكانت درجة حرارة الجزء الأسفل من الوشاح بالضرورة أكبر مئات الأضعاف من درجة حرارة الجزء العلوى منه، حيث أن توصيل الحرارة بواسطة الصخور يعتبر بطيئا جدا. ونتيجة لذلك فان لصخور الوشاح القدرة على التدفق تحت درجات الحرارة والضغط المتطرفين.



شكل 15 - 13
موقع الغلاف الوهن من الغلاف الصخري.



شكل 15 - 14

العلاقة بين التدرج الحراري المقترح للأرض ومنحنى درجات الانصهار لمواد الوشاح. ففي النطاق الواقع بين 100 كيلومتر و 250 كيلومترا تتعدى مواد الوشاح درجة انصهارها بقليل وهو ما يفسر وجود النطاق ذي السرعات المنخفضة.

وجود هذه المادة ذات السرعة البطيئة تحت القشرة المحيطية وتحت أجزاء من القارات الا أنها لا تحيط تماما بالأرض.

فمثلا يلاحظ انعدام وجودها تحت مناطق الدروع في القارات. ويدعم اكتشاف منطقة السرعة المنخفضة الافتراض المذكور سابقا الذي يقول بوجود منطقة صخور ضعيفة تقع تحت عمق 100 كيلومتر (شكل 15 - 13). ويطلق على هذا الجزء المحتوي على المواد الضعيفة، الغلاف الوهن. وعلى عكس نطاق السرعة المنخفضة التي تنعدم تحت أجزاء من القارات، فيعتقد بأن الغلاف الوهن يكون نطاقا يحيط كليا بالأرض. هذا بالإضافة الى أن هذا النطاق الضعيف قد يصل في بعض المناطق الى عمق 700 كيلومتر. ولكن الجزء الأعلى فقط منه هو الذي يحتوي على صخور منصهرة جزئيا. وكما يمكن مشاهدته في شكل 15 - 14 فان هذا النطاق الضعيف موجود، لأن صخور هذا المستوى هي أقرب الى درجة الانصهار من الصخور التي فوقها أو التي تحتها. ولذلك فان صخور هذه المنطقة قابلة للتشكل مثلها في ذلك مثل الحديد الأحمر الساخن.

وفوق الغلاف الوهن يقع نطاق هش بارد ذو سمك يصل حوالى 100 كيلومتر يسمى بالغلاف الصخري

السليكون (س أ 2) وذلك بدلا من معادن السليكات التي لها نفس التركيب الكيميائي.

اللب

وكما هو الحال بالنسبة للنطاقات التي تم تناولها بالوصف، فقد تم التحقق من وجود لب مركزي للأرض عن طريق المعلومات الاهتزازية. ولب الأرض الذي يمثل كرة صماء بداخله يبلغ نصف قطرها 3486 كيلومترا. وهو بهذا الحجم يعد أكبر من كوكب المريخ. ويمثل لب الأرض، الذي يمتد من الطرف الداخلي للوشاح الى المركز حوالى سدس حجم الأرض وما يقرب من ثلث كتلتها. ويفوق الضغط عند مركز الأرض ضغط الهواء عند سطحها بـ 3000 و 5000 درجة مئوية. وبعد أن توفرت معلومات اهتزازية أدق، وجد أن اللب يتركب من نطاق خارجي سائل يبلغ سمكه 2270 كيلومترا وكتلة داخلية صلبة يبلغ نصف قطرها 1216 كيلومترا.

ومن خصائص اللب الأكثر أهمية هي كثافته العالية. إذ تزيد كثافته عند الحد الفاصل بينه وبين الوشاح عن عشرة أضعاف كثافة الماء. وعند المركز تبلغ كثافة اللب أكبر بمقدار 13.5 ضعفا من كثافة الماء، بحيث تصل الى الكثافة الهائلة التي حسبت لمواد اللب. ولا يعتقد بأن المعادن الشائعة بالقشرة من السليكات والتي لها كتلة تتراوح ما بين 26 - 35 ضعفا من كتلة الماء يمكن أن يكون لها تراصا، كافيا بحيث تغطي الكتلة الهائلة لللب. ولذلك فقد اجريت محاولات عدة لتحديد المواد التي تمتلك هذه الخاصية.

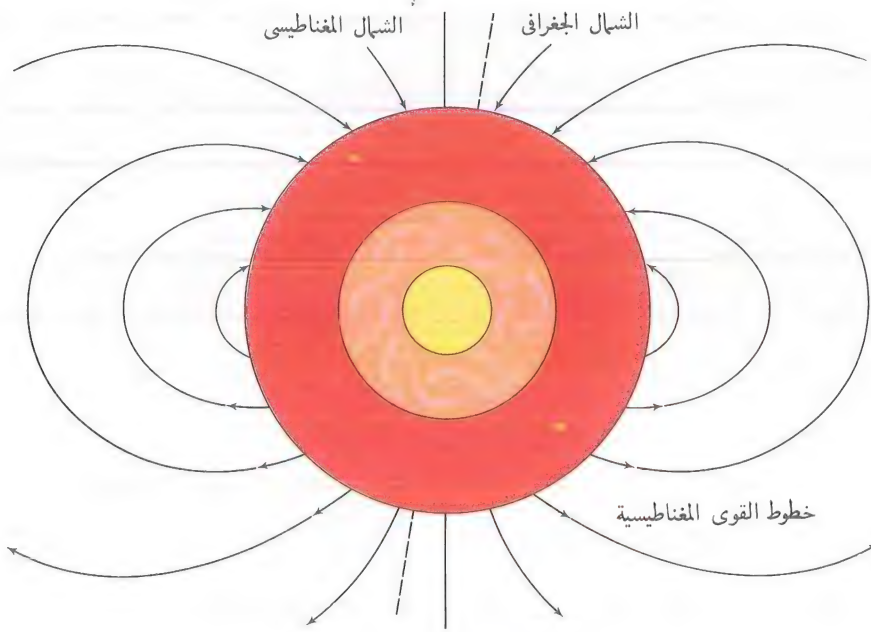
ومن الغريب أن تزودنا النيازك بمعلومات هامة عن التركيب الداخلي للأرض. حيث أن النيازك هي جزء من النظام الشمسي فيمكن اعتبارها مثلة للمواد التي تكونت أصلا منها الأرض، إذ يتراوح تركيبها بين الأنواع المعدنية التي تتألف أساسا من عنصر الحديد وبين النيازك الحجرية المكونة من مواد صخرية تشبه الى حد كبير صخور

(شكل 15 - 12). ويشمل الغلاف الصخري في حقيقته القشرة الصخرية بأكملها كما يشمل أيضا الجزء العلوى من الوشاح ويعرف بأنه نطاق الأرض البارد الى درجة يتصرف عندها كجسم صلب هش.

ويعتقد بأن التقلبات داخل الغلاف الوهن الضعيف هي التي تسبب الحركة في الغلاف الصخري الصلب فوقه. ويعد اكتشاف هذا النطاق الضعيف مساهمة فعالة لنظرية تحرك الألواح، والتي تفترض أن ألواح الغلاف الصخري تتحرك على امتداد سطح الأرض. ومن الجزء العلوى للغلاف الوهن تنشأ أيضا بعض الصخور المنصهرة المصاحبة للنشاط البركاني.

وعند عمق 400 كيلومتر تقريبا، تم اكتشاف زيادة مفاجئة في سرعة الموجات الاهتزازية (شكل 15 - 12). وبينما يسود الاعتقاد بأن الزيادة في السرعة عند الحد الفاصل بين القشرة والوشاح، ترجع الى تغير في التركيب المعدني؛ فإنه يعتقد بأن الزيادة في السرعة عند مستوى عمق 400 كيلومتر ناتجة عن تغير في الطور (الحالة). ويحدث التغير في الطور هذا عندما تغير المعادن من بنيتها البلورية استجابة لتغير في الحرارة أو الضغط أو الاثنين معا. وقد دلت التجارب العملية على أن معدن الأوليفين (ما، ح²) س أم الذي هو أحد المكونات الرئيسية لصخور البيريدوتيت سوف يتقلص الى معدن ضغط عال أكثر تراصا عند الضغوط السائدة في هذه الأعماق. وقد يفسر هذا التغير التركيبي الزيادة المنتظرة في سرعة الموجات الاهتزازية.

ويعتقد بأنه تم اكتشاف فاصل آخر عن طريق التفاوت في سرعة الموجات الاهتزازية عند عمق 700 كيلومتر (شكل 15 - 12). إذ يعتقد بأنه عند هذا العمق تنفصل المعادن التي في صخور البيريدوتيت وتتواجد على هيئة أكاسيد معدنية بسيطة ولذلك فإنه بين عمق 700 كيلومتر وعمق 2885 كيلومترا، يعتقد بأن الوشاح يتكون أساسا من أكسيد الحديد (ح أ) وأكسيد الماغنيسيوم (ما أ) وثاني أكسيد



شكل 15 - 15

يعتقد بأن نشأة الحقل المغناطيسي للأرض يعود إلى الخلط الشديد المستمر لسبائك الحديد المنصهرة في اللب الخارجي السائل.

والعنصران اللذان يحتمل أن يصنعا سبيكة مع الحديد ويبرران كثافته الاختبارية وحالة سيولة اللب الخارجي، هما الكبريت والاكسجين. كما انه لا يشك في وجود مواد أخرى بكميات قليلة من بينها السليكون والكربون.

ورغم أنه قد تأكد وجود لب مركزي معدني التركيب للأرض، إلا أن الجهود المبذولة لتحديد ماهية هذا اللب لا تزال موضع تخمين. ويذهب أكثر التصورات قبولا إلى القول بأن اللب قد نشأ مبكرا في تاريخ الأرض من كتلة كانت متجانسة في تركيبها. هذا وقد تم تسخين الكتلة الأرضية برمتها أثناء فترة نموها بواسطة الطاقة الحرارية الناجمة عن المواد المتساقطة نحوها، حتى وصلت درجة الحرارة الداخلية للأرض في وقت لاحق ارتفاعا يكفي لاستيعاب المواد المتجمعة فوقها. وقد تجمعت الكتل الثقيلة والغنية بالحديد وغاصت في اتجاه المركز. وفي نفس الوقت، طفت المواد الخفيفة إلى أعلى لتكون الوشاح وربما بعض أجزاء من القشرة. وخلال فترة جيولوجية قصيرة نسبيا، اكتسبت الأرض نطاقات تركيبية لا تختلف كثيرا عما هي عليه اليوم.

البيريديوتيت. ونظرا لكون نسبة الحديد في القشرة الأرضية أقل بكثير من وفرته النسبية في الشظايا الآتية من النظام الشمسي، فقد استنتج الجيولوجيون من ذلك أن صلب الأرض لا بد أن يكون غنيا بهذه المادة الثقيلة. وعلاوة على ذلك، فالحديد هو المادة الوفيرة في النظام الشمسي التي تمتاز بكثافة مناسبة. ورغم أنه يغلب على اللب التركيب الحديدي إلا أنه لا يمكن أن يكون نقيًا. إذ تشير التجارب إلى أن كثافة الحديد النقي تحت الضغوط الشديدة المشابهة كما هو في اللب تزيد بحوالي 10% عن الكثافة الحقيقية للحديد. ولتفسير هذه الحقيقة، فقد اقترح أن اللب لا بد أن يحتوي على بعض المعادن الأخف من الحديد، والتي تصنع منه سبيكة مما يقلل من كثافته. وما يعزز هذا الرأي أن درجة حرارة اللب لا تصل إلى درجة انصهار الحديد على أحسن تقدير. إذ لو كان اللب الخارجي مركبا من الحديد الخالص لتصلب منذ أمد بعيد ولكان ذلك مناقضا للمعلومات الاهتزازية المعروفة عنه. فكون اللب الخارجي سائلا يمكن تفسيره على أساس إضافة عناصر خفيفة من شأنها أن تخفض من درجة انصهار الحديد بعد اختلاطها به.

تيارات مستمرة في النطاق السائل فوقها. كما يدعم تصورنا لب من حيث كونه كرة صلبة داخلية يحيط بها غلاف سائل متحرك، وجود حقل مغناطيسي للأرض كما لو وضع بداخلها عمود مغناطيسي ضخيم. وكلنا يعلم أنه لا يمكن أن يكون مصدر الحقل المغناطيسي معدنا دائم المغنطة لأن درجة حرارة جوف الأرض لا تسمح باحتفاظ المواد بمغناطيسيتها. إذ تتطلب الطريقة الوحيدة التي يمكن قبولها لتفسير المجال المغناطيسي للأرض، أن يكون لب الأرض من مادة موصلة للكهرباء مثل الحديد وفي حالة سائلة لدرجة الجريان (شكل 15 - 15). ويتوفر كلا هذين الشرطين في نموذج لب الأرض المستمد من المعلومات الاهتزازية.

كيف إذاً نفسر وجود لب خارجي في حالة سائلة في الوقت الذي يوجد فيه اللب الداخلي في حالة صلبة رغم أن درجة حرارته أشد؟ أغلب الظن أن اللب بقسميه كان سائلا في مرحلة تكونه الأولى. وقد كانت هذه السبيكة الحديدية السائلة في حالة خلط عنيف، بينما استمر انفصال مواد اللب عن بعضها ببطء خلال الثلاثة ونصف بليون سنة الماضية. وعندما بدأ اللب يبرد انتقل جزء من المركبات الحديدية إلى أسفل بينما طفت المركبات الخفيفة إلى أعلى في اتجاه حافة اللب. وقد بدأت المركبات الحديدية الهابطة في التصلب بعد أن فقدت العناصر الخفيفة التي تخفض من درجة الانصهار. هذا كما ينشأ عن هبوط المواد الثقيلة إلى أسفل وتبليها طاقة جذب وحرارة التحام وهذان بدورها يعملان على توليد

أسئلة

للمراجعة :

- 1 - عدد الفروق الأساسية بين الموجات الأولية (و) والموجات الثانوية (ث).
- 2 - كيف يختلف الحد الفاصل بين القشرة والوشاح (الموهو) عن الحدين الفاصلين اللذين يقعان عند أعماق حوالى 400 كيلومتر و 700 كيلومتر من سطح الأرض؟
- 3 - صف الغلاف الصخري. ما هو الاختلاف المهم بينه وبين الغلاف الوهن؟
- 4 - صف التركيب الكيميائي (المعدني) للنطاقات الأربعة الأساسية للأرض؟
- 5 - لماذا كان من الصعب على العلماء المتخصصين الحصول على معلومات دقيقة متعلقة بزمن انتقال الموجات قبل نهاية القرن الماضي؟
- 6 - صف بدقة الطريقة التي استعملت لأول مرة لقياس حجم اللب الداخلي للأرض.
- 7 - كيف أمكن الحصول على عينات من مكانها في قاع أعماق المحيطات لأول مرة؟
- 8 - ما هو الدليل الذي أتى به جوتنبرج ليبرهن على وجود لب مركزي للأرض؟
- 9 - لو فرضنا أن المنطقة الضحلة للموجات الأولية (و) تقع بين 120° و 160° بدلا من 105° و 140° ما دلالة ذلك على حجم اللب؟

- 10 - اشرح لماذا يستطيع الغلاف الوهن أن يتدفق مثل السوائل ، في الوقت الذي تنتقل فيه الموجات الثانوية (ث) التي لا تستطيع الانتقال عبر السوائل؟
- 11 - لماذا تعتبر النيازك دلالات مهمة على تركيب جوف الأرض؟
- 12 - ما هو الدليل المستمد من علم الاهتزازات على سيولة اللب الخارجي؟ وما هي الأدلة الأخرى التي تؤكد سيولة اللب الخارجي؟
- 13 - لماذا يمكن لللب الخارجي أن يوجد على حالة سائلة بينما يوجد اللب الداخلي على حالة صلبة رغم ارتفاع درجة حرارته؟
- 14 - في الفصل السابق أشير الى أن الزلازل تقع فقط في الصخور الهشة القادرة على تخزين الطاقة المرنة، أما تحت عمق 100 كيلومتر فإن الصخور ضعيفة القوام وتتدفق بحرية عندما تتعرض للضغط. كيف إذاً يمكن تفسير الزلازل ذات البؤر العميقة؟

الكلمات الدالة :

crust	قشرة		
inner core	لب داخلي		
outer core	لب خارجي	lithosphere	غلاف صخري
low velocity zone	نطاق سرعة منخفضة	asthenosphere	غلاف وهن
shadow zone	نطاق ظل	Moho discontinuity	فاصل موهوروفيشك
mantle	وشاح		أو موهو

16



حركة الألواح

16



قشرتها الخارجية الصلبة وانشئت لتناسب الكوكب المنكمش. وعليه فقد كان ينظر الى الجبال بأنها تشابه التجاعيد على سطح فاكهة جافة. وبالرغم من عدم ملائمة هذا النموذج حول عمليات تكتونية الأرض إلا أنه قد بقى راسخا في التفكير الجيولوجى لذلك الوقت. وقد تمّ تفسير حتى التغير في مستوى سطح البحر، الذى كان واضحا من البقايا الأحائية البحرية بعيدا داخل القارات، وذلك باستعمال نموذج الأرض المتقلصة تدريجيا. وقد قيل وقتها بأن تشكّل قشرة الأرض الخارجية قد خسف بعض المناطق حيث غمرتها البحار وبرزت مناطق أخرى فوق مستوى سطح البحر لتصبح جزءاً من اليابسة.

وقد حدث تطوّر هائل خلال العقود الزمنية القليلة الماضية في علوم الأرض، وذلك لتراكم العديد من المعلومات الجديدة، مما غير جذريا في مفهومنا حول تركيب الأرض والعوامل المؤثرة فيها. وقد أدرك علماء الأرض الآن بأن مواقع الكتل الأرضية ليست ثابتة، بل إنها تتحرك على الكرة الأرضية بالتدرّج. وقد أدى إنشطار الكتل القارية الى تكوين أحواض محيطية جديدة بينا تغوص الأجزاء القديمة من قيعان المحيطات داخل الخنادق المحيطية العميقة. وفي ذات الوقت ارتطمت أجزاء أخرى من الكتل القارية المنفصلة وكونت سلاسل الأرض الجبلية الكبيرة. وباختصار فقد ولد نموذج جديد لتكتونية الأرض يختلف تماما عما كان مقبولا منذ عقود قليلة.

وقد وصف هذا التبدّل في التفكير العلمى بكونه ثورة علمية. وقد مضى زمن طويل منذ بداية هذه الثورة قبل التسليم بها شأنها في ذلك شأن الثورات العلمية الأخرى. وقد بدأت هذه الثورة العلمية خلال الجزء الباكر من القرن العشرين، باقتراح واضح يقول بأن القارات قد إنجرفت حول سطح الأرض. وبعد نقاش حاد دام سنوات عدّة حول فكرة إنجراف القارات، رفضها السواد الأعظم من علماء الأرض وعلى الأخص جيولوجيو أمريكا الشمالية ربما لأن معظم الأدلة قد جاءت من نصف الكرة الأرضية الجنوبي. وهذه الحقيقة تعكسها المعلومات القليلة الواردة في النشرات

إنجراف القارات: فكرة سبقت زمانها

- التوافق الشكلى لحواف القارات
- الدليل الاحاثى
- تشابه أنواع الصخور والتراكيب
- الدليل المستمد من المناخ القديم

المناظرة الكبيرة

إنجراف القارات والمغناطيسية القديمة

بداية ثورة علمية

- إنفراج قاع البحر

- معكوسات المغناطيسية الأرضية

حركية الألواح: تقديم جديد لفكرة قديمة

حواف الألواح

- الحواف المتباعدة

- الحواف المتقاربة

- فوالق التحويل

إختبار النموذج

- حركية الألواح والزلازل

- أدلة من مشروع الحفر بأعماق البحار

- البقع الساخنة

الميكانيكية المحركة

لقد ساد الاعتقاد بين الجيولوجيين في أوائل هذا القرن بقدم أحواض المحيطات الترسيبية، بل إن معظمهم قد قبل بفكرة ديمومة القارات والمحيطات. وقد كانوا يعتقدون بأن الجبال قد تكوّنت بفعل انكماش الأرض بفقدانها التدريجى للحرارة، حيث كان يعتقد بأنها كانت منصهرة في مجملها في وقت ما. وبانخفاض درجة حرارة باطنها وإنكماشه تشكّلت

شبه جزيرة سيناء، تحيط بها صدوع يعتقد أنها تكوّنت بفعل إنفراج قاع البحر.

الفكرة القائلة بأن هذه الكتل القارية قد كانت وحدة واحدة في يوم من الأيام.

التوافق الشكلي لحواف القارات

لقد لفت نظر واغنر في البداية الشبه بين حواف القارات المتقابلة على جانبي جنوب المحيط الأطلسي شأنه في ذلك شأن بعض الآخرين من قبله، مما جعله يرى احتمالية أنها كانت متصلة ببعضها البعض. ولكن محاولته إعادة تركيب جانبي المحيط باستعمال الشواطئ الحالية سرعان ما لقي معارضة من باقى علماء الأرض الذين أصابوا في قولهم بأن الشواطئ عرضة للتغير الدائم نتيجة لعوامل التعرية. وقد استبعدوا نتيجة لذلك التوافق التام بين حواف القارات حتى لو أنهم سلموا بفكرة الانجراف هذه. وبالإضافة الى ذلك فان الدليل الأحاثى الوفير يشير الى أن معظم كتل اليابسة حول العالم قد تعرضت إما الى الرفع أو الخسف خلال الفترة الأخيرة من التاريخ الجيولوجى، مما ترتب عليه إعادة تشكيل الشواطئ القارية. ويبدو أن واغنر كان منتبها الى هذه المشاكل. وقد كان فى الحقيقة مقترحه الأصلي لما يشبه لعبة أحجية الصور المقطوعة غير ناضج.

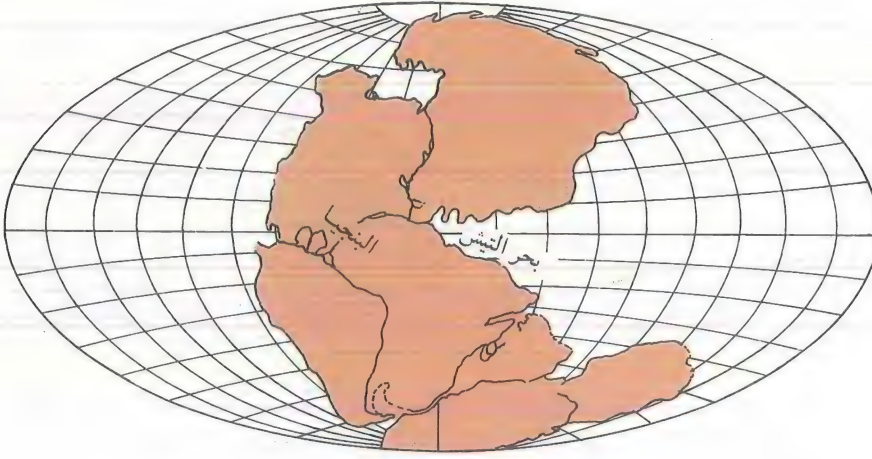
ولقد وجد أن الحواف الخارجية للرف القارى تمثل حدودا أكثر دقة للقارات. وتقع حواف الأرف القارية اليوم تحت أعماق تبلغ المئات من الأمتار تحت مستوى سطح البحر. وقد حاول ادوارد بولارد فى أوائل الستينات مع اثنين من مساعديه مطابقة القارات لبعضها البعض باستعمال الحاسوب عند عمق 900 مترا. ويوضح الشكل 16 - 2 التوافق الواضح فى شكل القارات عند ذلك العمق. وبالرغم من أن القارات قد تراكبت هنا فى بعض أجزائها إلا أن تلك المواقع تمثل أماكن تراكم كميات هائلة من الرسوبيات الناتج عن عمل بعض الأنهار، مما عمل على زيادة مساحة بعض القارات. ولقد كانت النتيجة التى وصل إليها بولارد وزميله فى محاولتهم هذه أحسن مما كان يتوقعه مناصرى هذه النظرية.

العلمية بالولايات المتحدة بين سنة 1930 وسنة 1950. غير أنه خلال الخمسينات والستينات من هذا القرن برز دليل جديد بعث الروح ثانية فى هذا المقترح المنسى. وبحلول سنة 1968 أدت هذه التطورات الى ظهور نظرية جديدة أكثر شمولية من الانجراف القارى تعرف بنظرية حركية الألواح.

وستعرض فى هذا الفصل الى التطورات التى أدت الى هذا التبدل الجذرى فى التفكير العلمى وذلك فى محاولة للتعريف بتطور العلم. وستتبع باختصار التطورات التى حدثت منذ إقترح فكرة إنجراف القارات الى مرحلة القبول العام بنظرية حركة الألواح. كما سنقدم أيضا الأدلة المؤيدة لهذه الفكرة.

إنجراف القارات: فكرة سبقت زمانها

لقد برزت فكرة التوافق الشكلي لحواف القارات وعلى الأخص أمريكا الجنوبية وأفريقيا فيما يشبه لعبة أحجية الصور المقطوعة مع بداية خروج خرائط العالم الأكثر دقة. ولم تعط هذه الفكرة أهمية تذكر حتى سنة 1915 عندما نشر ألفرد واغنر عالم الأرصاد والجيوفيزياء الألمانى شرحاً مفصلاً لمحاضرة سبق وأن ألقاها سنة 1912 ، وذلك فى كتابه الذى صدر بعنوان أصل القارات والمحيطات. وقد تقدم هنا واغنر بالخطوط العريضة لأساس نظريته المتطرفة التى عرفت بنظرية انجراف القارات. وقد كانت إحدى معتقداته الرئيسية تقول بسبق وجود قارة عظمى أسماها البنجيا - تعنى كل اليابسة - (شكل 16 - 1). وقد زاد على ذلك قوله بأن هذه القارة العظمى قد بدأت فى الانشطار الى قارات أصغر حوالى 200 مليون سنة مضت. ومن ثم إنجرفت هذه القارات الصغيرة الى مواقعها الحالية. وقد قام واغنر وأتباعه بجمع الكثير من الأدلة التى تساند هذا الادعاء. وقد بدا أن التوافق الشكلي لحواف أمريكا الجنوبية وأفريقيا، والتشابه فى المناخ القديم، والدليل الأحاثى، الى جانب التراكيب الصخرية، كل ذلك قد ساند



شكل 16 - 1

إعادة تركيب البنجيا كما يعتقد
أنها كانت عليه حوالى 200
مليون سنة مضت.

وجد واغنر أن معظم علماء الاحاثية يعتقدون بوجود وصلة من اليابسة بين الكتل القارية البعيدة وذلك لتفسير التشابه التام فى مكوناتها الأحاثية، وبالذات لأنماط الحياة التى ترجع الى دهر الحياة المتوسطة. ولتدعيم موقفه من سبق وجود ما أسماه بالبنجيا إستعمل واغنر الدليل الأحاثى الموثق آنذاك والذي يشير الى أن بعض الكائنات لم يكن فى مقدورها الانتقال عبر المحيطات التى تفصل بين القارات الحالية وعلى الأخص نبات الجلوسوبترس *Glossopteris* وهو من السراخس الواسعة الانتشار فى القارات الجنوبية، أى أفريقيا وأستراليا وأمريكا الجنوبية أثناء دهر الحياة المتوسطة، وقد اكتشفت مستحاثات هذا النبات فيما بعد فى قارة القطب الجنوبي. وبالإضافة الى ذلك فقد وجدت بقايا لنوع من الزواحف السباحة من جنس الميزوزوراس *Mesosaurus* فى شرقى أمريكا الجنوبية وغرب أفريقيا (شكل 16 - 3). وبالرغم من أن هذا الزاحف ربما كانت له القدرة على السباحة فى المياه الضحلة بأماكن تواجد غير أنه واضح أنه لم يكن بإمكانه الانتقال عبر المحيط الأطلسى. وقد أعطى الدليل الأحاثى دعما لا يمكن تجاهله لفكرة واغنر بسبق وجود قارة البنجيا.

وقد تعرض واغنر أيضا فى كتابه الى توزيع الكائنات

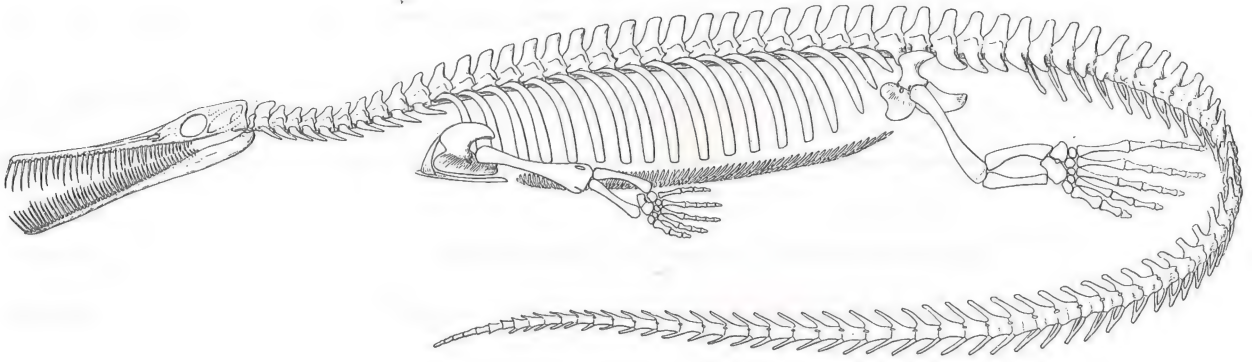


شكل 16 - 2

إعادة تركيب قارتى أمريكا الجنوبية وأفريقيا عند حدود المنحدر
القارى على عمق 500 قامة (حوالى 900 متر).

الدليل الأحاثى

وبالرغم من أن التوافق الشكلى لشاطئى الأطلسى قد أثار إنتباه واغنر ولكنه لم ير أمر حركية القارات ممكنا حتى عثر على مقالة تشير الى الدليل الأحاثى القائل بوجود نوع من الجسر الأرضى بين أمريكا الجنوبية وأفريقيا. وبقراءته



شكل 16 - 3

رسم لهيكل مستحاثات الميسوسوراس . يبدو أن بقايا مستحاثات هذا الكائن التي وجدت على قارتي أفريقيا وأمريكا الجنوبية يبدو أنها تربط بين هاتين الكتلتين من اليابسة أثناء دهر الحياة المتوسطة.

ولكن المطلوب أيضا هو التناسق والاستمرارية في الصورة عامة. والصورة المطلوبة في لعبة إنجراف القارات تتمثل في أنواع الصخور والسلاسل الجبلية الموجودة على هذه القارات. فإذا ما كانت القارات متصلة ببعضها فلا بد من تشابه صخورها نوعا وعمرا في الأجزاء المتجاورة. فمثلا قد وجد أن هذا التشابه موجود بين صخور شمال غربى أفريقيا وشرقى البرازيل. وقد أوضحت الدراسات الحديثة لهذا الدليل القديم صحة اعتقاد واغنر. ففى كلا المنطقتين وجدت صخور يبلغ عمرها 550 مليون سنة مجاورة لأخرى ترجع الى بليونى سنة مضت بطريقة كان فيها الحد الفاصل بين هذين النوعين من الصخور مستمرا عند وضع القارتين متجاورتين (شكل 16 - 5).

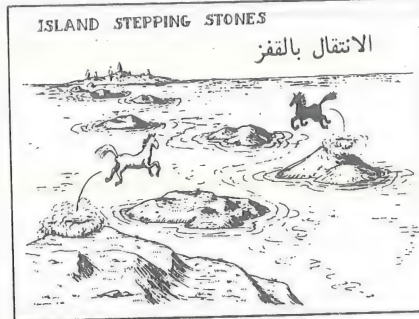
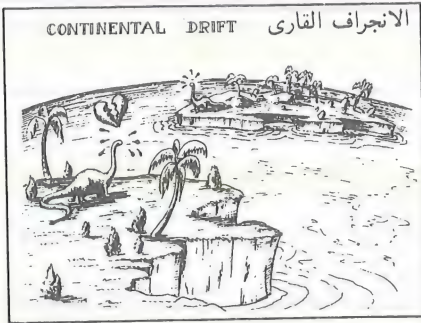
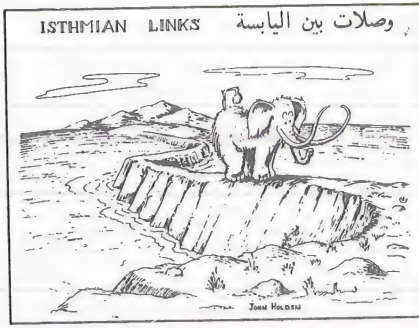
ودليل آخر لتصوير انجراف القارات هو السلاسل الجبلية التى تنتهى عند ساحل احد القارات لتظهر ثانية فى كتلة قارية أخرى عبر المحيط فمثلا سلسلة جبال الأبالاش ذات الاتجاه شمال شرقى شرق الولايات المتحدة تنتهى عند شاطئ نيوفاوندلاند. وتوجد جبال مشابهة لها فى العمر والتراكيب بجرينلاند وشمال أوروبا. وعند إعادة تركيب هذه الكتل القارية كما يوضح الشكل 16 - 1 تكون هذه السلاسل الجبلية حزاما متوصلا تقريبا. وتوجد العديد من

الحديثة كدليل على إنجراف القارات. فمثلا الكائنات الحديثة التى انحدرت من أصل واحد لا بد وأنها تطورت بمعدل عن بعضها أثناء بضع من ملايين السنين الماضية. وأوضح مثال لذلك الجراييات الأسترالية التى وجد أن لها علاقة إحاثية مباشرة مع الجرابى الألبوسوم الأمريكى.

كيف يمكن تفسير التشابه الواضح بين المستحاثات النباتية والحيوانية والتى وجدت فى مواقع تبعد عن بعضها آلاف الكيلومترات عبر المحيطات المفتوحة؟ وقد كانت فكرة الجسور الأرضية بين القارات أكثر قبولا لحل مشكلة الهجرة هذه (شكل 16 - 4). فنحن نعرف مثلا أنه خلال الفترة الجليدية الحديثة إنخفض مستوى سطح البحر مما سمح للحيوانات بعبور مضيق بيرنج بين آسيا وأمريكا الشمالية. فهل من الممكن أن قارتي أمريكا الجنوبية وأفريقيا كانتا متصلتين عبر جسر من اليابسة؟ نحن الآن على يقين بعدم سبق وجود مثل هذا الجسر وإلا كانت بقاياها موجودة فى مكان ما بين القارتين.

تشابه أنواع الصخور والتراكيب

لا بد أنه كان جليا لكل من جرب لعبة أحجية الصور المقطوعة أنه ليس المطلوب فقط التوافق فى تركيب القطع،



شكل 16 - 4

رسومات تخطيطية لجون هولدن
توضح عدة تفسيرات لظاهرة
وجود أنواع متشابهة من الأحياء
على كتل من اليابسة بعيدة كل
البعد عن بعضها في الوقت
الحاضر.



شكل 16 - 5

إعادة تركيب أفريقيا وأمريكا
الجنوبية وهي توضح التشابه في
عمر الصخور بين القارتين.

التي كُنت فيما بعد تراكمات الفحم شرقى الولايات المتحدة وأوروبا وسيبيريا. وكما اقترح واغنر يمكن تفسير هذه الظاهرة بإعادة تركيب الكتل القارية في قارة واحدة وازاحتها قليلا تجاه القطب الجنوبي. وهذا كفيل بتهيئة الظروف اللازمة لتكوّن الجليد فوق جلّ نصف الكرة الجنوبي وفي نفس الوقت تسببت هذه الحركة في تقريب الكتل الأرضية الشمالية من خط الاستواء ووضعها في موقع مناسب لتكوين هذه الرواسب الفحمية الهائلة.

كيف تكوّن الجليد في مناخ أستراليا الجاف والحار؟ كيف استطاعت الحيوانات البرية الهجرة عبر المسافات الهائلة من مياه البحر؟ وبقدر ما كان هذا الدليل مقنعا فلقد مرّت خمسون سنة قبل أن يقبله المجتمع العلمى ويسلم بالنتائج المقنعة التي أدى إليها.

المناظرة الكبيرة

لم تتعرض نظرية واغنر الى كثير من النقد حتى سنة 1924 عندما ترجم كتابه الى الانجليزية. ومنذ ذلك الوقت حتى وفاته سنة 1930 تعرضت نظريته حول انجراف القارات الى الكثير من النقد اللاذع. فقد كتب ر. ت. شامبرلن الجيولوجى الأمريكى المعروف هازا يقول: إن فرضية واغنر غير مشدودة الوثاق بصورة عامة، فقد تجاوزت حدود اللياقة في حق كوكبنا، فهى إما سائبة القيد أو مُحكّمة بحقائق تزيد في بشاعتها عن جميع النظريات المنافسة لها. ويكمن سرفقتها في أنها لعبة لا تحكمها العديد من القواعد أو اللوائح المقيدة. وقد عبر و. ب. سكوت الرئيس السابق لجمعية الفلاسفة الأمريكيين عن الرأى السائد في بلاده نحو فكرة الانجراف القارى في كلمات أقل حين وصفها بقوله أنها هراء ملعون.

وقد كانت أحد العقبات أمام فرضية واغنر هو فشله في تقديم ميكانيكية لعملية الانجراف القارى. فقد اقترح واغنر احتمالن كمصدر لطاقة الانجراف. أحدها ظاهرة المد والجزر

التراكيب الصخرية التي يظهر أنها متزامنة في تكوّنهما وتم فصلها بعد ذلك.

وقد كان واغنر جدّ مقتنع بهذا الشبه في التراكيب الصخرية على جانبي المحيط الأطلسى. وقد ذهب الى أبعد من ذلك حين اقترح مخطئا أن الركام الجليدى بأمرىكا الشمالية يوافق ذلك الموجود بأوروبا الشمالية حيث قال: نحن بعملنا هذا وكأنا نقوم بإعادة قطع ورق الجريدة الممزقة الى سابق مكانها، وفي كل مرة ننظر فيما إذا كانت السطور متناسقة عبر الأجزاء الممزقة، وإذا ما كانت كذلك ليس هناك ما نخلص اليه إلا كون أن هذه الأجزاء قد رجعت الى مواقعها الأصلية.

الدليل المستمد من المناخ القديم

وحيث أن ألفرد واغنر كان إخصائى مناخ بالخبرة فقد اهتم بالمعلومات حول المناخ القديم لدعم نظريته. وقد توجت مجهوداته هذه بعثوره على دليل لما يبدو أنه تغير هائل في المناخ. فالرسوبيات الجليدية مثلا قرب نهاية دهر الحياة القديمة (بين 220 و 300 مليون سنة مضت) دلت على أن ملاءات جليدية قد غطت مساحات واسعة من نصف الكرة الجنوبي. وقد وجدت طبقات من الرسوبيات الجليدية عند نفس المستوى الطبقي بجنوب القارة الأفريقية وأمريكا الجنوبية والهند وأستراليا. وتوجد تحت هذه الرسوبيات خدوش وأثلام على الصخور. وقد بينت هذه الخدوش والأثلام في بعض المواقع أن الجليد قد تحرك من البحر الى اليابسة (شكل 16 - 6). وتقع الآن معظم المناطق التي وجد بها الدليل الجليدى الأخير من دهر الحياة القديمة بين خط عرض 30 وخط الاستواء وذلك في مناخ قارى أو شبه قارى.

فهل من الممكن أن الكرة الأرضية قد مرّت بظروف باردة أدت الى تكوين المجلدات القارية بالمناطق الاستوائية الحالية؟ لم يقبل واغنر بهذا التفسير لأنه خلال نهاية دهر الحياة القديمة كانت هناك بحيرات كبيرة في المناطق القارية بنصف الكرة الشمالى، وهى المواقع التي نمت فيها الأشجار



شكل 16 - 6

(أ) - اتجاه حركة الجليد في جنوب القارة العظمى المسماة جندوانالاند من قبل واضعي أسس فكرة إنجراف القارات.
(ب) - خطوط جليد على سطح الطبقات الصخرية بجنوب أستراليا وهي تبين اتجاه حركة الجليد.

واغتر كذلك أن القارات الضخمة قد إنشطرت خلال القشرة المحيطية ولكنه لا يوجد دليل بأن قاع المحيط كان من الضعف بحيث يسمح بمرور القارات دون تأثرها بوضوح أثناء ذلك. وحتى سنة 1929 كان النقد منصبا على أفكار واغتر من كل أوساط المجتمع العلمي. وبالرغم من كل ذلك

تحت تأثير القمر والتي اعتقد واغتر أنها من القوة بحيث تستطيع تحريك القارات تجاه الشرق. وقد جادل هنا هارولد جفرى الفيزيائي الشهير بقوله أن نتائج ظاهرة المد والجزر إذا ما كانت بالقوة اللازمة لتحريك القارات فهي ستعمل على إيقاف حركة دوران الأرض في بحر سنين قليلة. وقد قال

قام واغنر بكتابة طبعته الرابعة والأخيرة لكتابه محافظاً على مفهوم نظريته ومضيفاً لها الأدلة المساندة. وفي سنة 1930 قام واغنر برحلته الثالثة والأخيرة للمائة جرينلاند الجليدية. وبالرغم من أن إهتمامه الأساسي كان منصبا على دراسة مناخ الشتاء القارص بالجزيرة المغطاة بالجليد ولكنه أراد أيضاً أن يختبر نظريته حول الانجراف القارى. فقد رأى واغنر أن بإمكانه تحديد مواقع معينة يمكن قياس التغير بها على مدى سنوات. ومن هنا يمكنه إثبات إنجراف جرينلاند غرباً نسبة إلى أوروبا. وفي شهر نوفمبر من سنة 1930 هلك واغنر مع مرافق له أثناء عودته من محطة تجارب وسط جرينلاند، غير أن فكرته حول إنجراف القارات بقيت ولم تنتهى بانتهائه.

ولقد أصبحت فكرة حركة القارات الدائبة تشد الكثيرين ممن استمروا في بحثهم للكشف عن كنهها في الوقت الذي يرى فيها الكثيرون حلاً للظواهر التي لم يجدوا لها تفسيراً آخر.

أنجراف القارات والمغناطيسية القديمة

لم يطرأ جديد يذكر على فرضية واغنر للانجراف القارى منذ وفاته سنة 1930 حتى أوائل الخمسينات. فلم نكن نعلم الكثير عن طبيعة الأرض تحت مياه البحر والتي تمثل أكثر من 70 في المائة من المساحة الكلية لسطحها مع أنها المفتاح لفك أسرار كوكبنا الغامضة. وربما كانت مغناطيسية الصخور، وهى مجال جديد نسبياً، الدافع الذى حرك من جديد قضية إنجراف القارات.

فقد عكف العاملون الأوائل في مجال مغناطيسية الصخور على البحث في التغيرات القديمة لمجال الأرض المغناطيسى وذلك لتفهم أعمق لطبيعة مجالها الحالى. فكل من استعمل البوصلة يعلم أن لمجال الأرض المغناطيسى قطب شمالي وآخر جنوبى. ويقع هذين القطبين المغناطيسيين بالقرب من نظائرها الجغرافيين ولكن لا ينطبق أى منهما على الآخر. ويشبه مجال الأرض المغناطيسى المجال الذى يتكون حول قضيب مغنط بسيط حيث تمر خطوط القوة الغير مرئية من خلال الكرة الأرضية ممتدة من قطب إلى آخر (شكل 16

لماذا لم يستطع واغنر قلب معتقدات عصره؟ فبالرغم من أن فرضيته كانت صحيحة في الأساس غير أنها حوت الكثير من التفاصيل الخاطئة. فمثلاً لم تشطر القارات عند قاع المحيط كما أن طاقة المد والجزر لم تكن المحرك لانجراف القارات. ولتلقى أية فكرة علمية القبول من الجميع لا بد لها من أدلة تدعمها من باقى المجالات العلمية. ولقد أدرك واغنر نفسه ذلك حين قال مجيباً منتقديه، أنه يبدو أن العلماء لم يتفهموا بما فيه الكفاية أن جميع أفرع علوم الأرض لا بد وأن تشارك في إمطة اللثام عن طبيعة كوكبنا خلال الأزمنة الغابرة، ولن نستطيع الوصول إلى حقيقة الأمر إلا بجمع كل هذه الأدلة. وقد كانت مشاركة واغنر في تفهمنا للأرض تفتقر إلى جميع الأدلة المطلوبة كما وضعها وعليه فإنها لم تصمد. ولا بد وأن واغنر كان قد أجاب بنفسه على السؤال الذى كان لزاماً أن سألوه وهو: لماذا لم يقبلوا بمقترحاته؟

وبالرغم من أن معظم معاصري واغنر كانوا قد اختلفوا معه معارضين لأفكاره وإلى درجة السخرية منها على الملأ فإن البعض قد اعتبرها جديرة بالاهتمام، ومنهم الجيولوجى الكسندر دو توات من جنوب أفريقيا والاسكتلندى المعروف آرثر هولز. فقد نشر دو توات في سنة 1937 كتاباً بعنوان

وبالرغم أنه من المعلوم أن القطبين المغناطيسيين يتحركان من موقعيهما غير أن الدراسات للمجال المغناطيسي تدل على أن معدل مواقع القطبين المغناطيسيين يقارب من مواقع القطبين الجغرافيين. وهذه النتيجة تتمشى ومعلوماتنا حول المجال المغناطيسي للأرض والذي تكون جزئيا من حركة الأرض حول محورها. وإذا لم تتغير مواقع القطبين الجغرافيين وهو ما نعلم أنه يحصل فإنه لا يمكن للقطبين المغناطيسيين أن يتحركا. وعليه فإن التفسير الأكثر احتمالا لظاهرة الحركة القطبية يكمن في فرضية إنجراف القارات. فإذا ما بقى القطبان المغناطيسيان ثابتين في مكانهما فإن حركتهما الظاهرية يمكن أن تنتج عن حركة القارات.

وقد دعم الفكرة السابقة مقارنة موقع أوروبا الجغرافي نسبة الى خط الاستواء بواسطة الصخور المغنطة، الى جانب الأدلة المستمدة من دراسات المناخ القديم. وقد أشارت بالذات ظاهرة إنتشار المستنقعات بمعظم أوروبا، والتي نتج عنها تراكمات الفحم، الى أن هذه القارة كانت أكثر قربا من خط الاستواء. وهذه حقيقة تناسب المناخ الاستوائي الذي تدل عليه رسوبيات الفحم المذكورة.

وقد برز دليل آخر لانجراف القارات عندما أعد منحني بتحول القطبين لأمریکا الشمالية (شكل 16 - 9). وقد فوجيء الجميع بالشبه الواضح بين المسار القطبي لأمریکا الشمالية وأوروبا فيما عدى أنها يفصل بينهما 30 درجة على خطوط الطول. فعندما تصلبت هذه الصخور فهل من المعقول أنه كان للأرض قطبين مغناطيسيين شالين تحركا في خطين متوازيين؟ هذا طبعاً بعيد الاحتمال ولكن هذا الاختلاف في مساري هذه الهجرة القطبية يمكن تفسيره بإعادة تركيب القارتين بجانب بعضهما البعض كما نعتقد اليوم أنها كانتا عليه وذلك قبل إنفتاح المحيط الأطلسي.

وبالرغم من أن هذه المعلومات قد أعادت الروح في فكرة حركة القارات ولكنها لم تكن كافية لاجداث تغيير ملحوظ في الرأي العام العلمي. فالتقنية التي استعملت



شكل 16 - 9

خط حركة القطب الظاهرية لأمریکا الشمالية وأوروبا. اذا ما اعيد تركيب هاتين الكتلتين القاريتين وقفل شمال الأطلسي فإن هذين المسارين ينطبقان على بعضهما.

تصبح الابرة أفقية عند ذلك الخط وعليه فإنه من الممكن تحديد الموقع نسبة الى خط الاستواء وذلك من قيمة الميلان وبالمثل فإن وضع المغناطيسية القديمة في الصخور يدل على خط العرض الذي تمغنط فيه الصخر.

وقد أدت دراسة في الخمسينات بأوروبا لعدة طفوح من اللابا من أعمار مختلفة الى اكتشاف مهم وهو أن ترتيب إتجاه المعادن الغنية بالحديد داخل هذه الطفوح يختلف إختلافا كبيرا بناء على اختلاف أعمارها. وقد أدى توقيع أماكن القطب المغناطيسي الشالى على الخريطة نسبة للأزمنة المختلفة الى اكتشاف أنه تغير في موقعه من منطقة بالقرب من هاواي تجاه الشمال عبر سيبيريا الى مكانه الحالى (شكل 16 - 9) خلال الخمسمائة مليون سنة الفائتة. وهذا دليل واضح على أن القطبين المغناطيسيين قد غيرا مواقعهما (تحوّل القطبين) عبر الأزمنة الغابرة أو أن القارات قد إنجرفت.

وإد صدعى يمتد على طول مرتفع وسط المحيط الأطلسي مما يدل على وجود قوة شد كبيرة في المنطقة. وبالإضافة الى ذلك وجد أن منظومة مرتفع وسط المحيط يميزها دفق حرارى مرتفع وبعض النشاط البركانى. وفي نفس الوقت كانت هناك اكتشافات أخرى في باقى قاع المحيط فقد دلت الدراسات الزلزالية، بالقرب من بقاع الخنادق المحيطية العميقة، على وجود نشاط ما عند أعماق سحيقة تحت المحيط كما أن المرتفعات المسطحة عند أعماق تبلغ مئات الأمتار تحت مستوى سطح البحر بها ما يدل على أنها كانت جزراً. هذا ولم يتمكن الباحثون من إلتقاط عينات من القشرة المحيطية يزيد عمرها على دهر الحياة المتوسطة. فهل من الممكن أن تكون قيعان المحيطات ظاهرة حديثة جيولوجياً؟

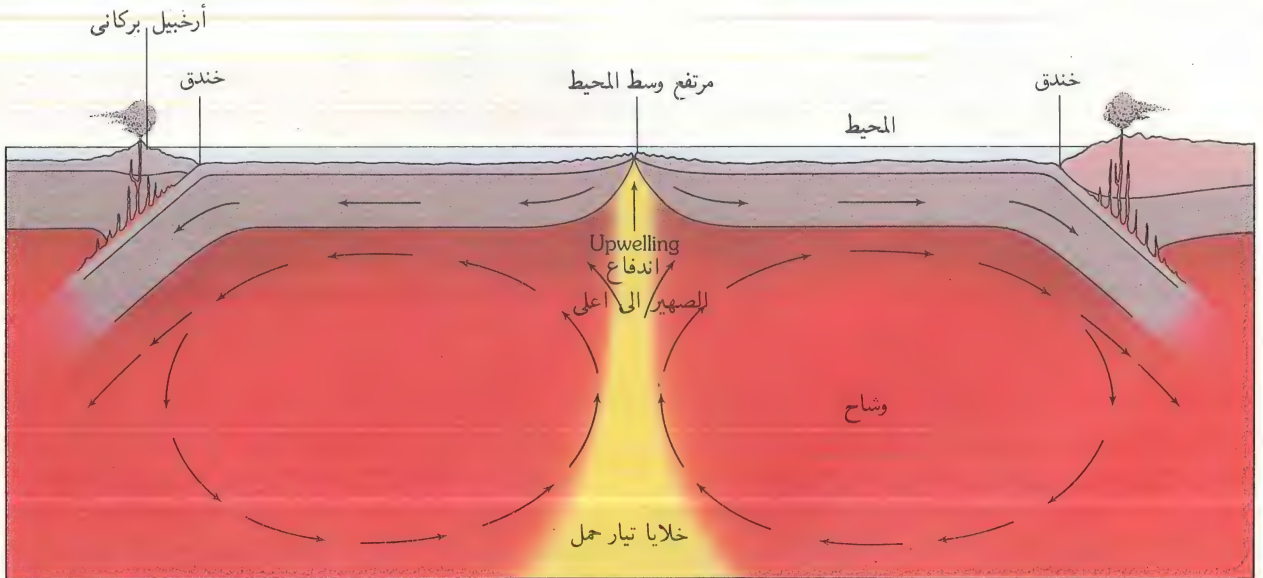
إنفراج قاع البحر

لقد جمع هارى هس من جامعة برنستون كل هذه

لاستخلاص معلومات المغناطيسية القديمة كانت حديثة العهد وغير موثوق بها الى جانب أن مغناطيسية الصخور تضعف بمرور الزمن. وللصخور قابلية أن تكتسب مغناطيسية ثانوية أيضاً. وبالرغم من هذه المشاكل وغيرها من الأدلة المتضاربة فإن بعض الباحثين كانوا مقتنعين بحدوث الانجراف. وبدأ فجر جديد.

بداية ثورة علمية

لقد ساعد التطور التكنولوجى الكبير خلال الخمسينات والستينات من هذا القرن على التخریط الدقيق لقاع المحيط والذى بالتالى أدى الى اكتشاف سلاسل مرتفعات وأسطح المحيطات. فقد وجد أن مرتفع وسط المحيط الأطلسي ذو اتجاهات موازية للحواف القارية على جانبي الأطلسي (شكل 1 - 11). ولقد كان أيضا بنفس الأهمية اكتشاف

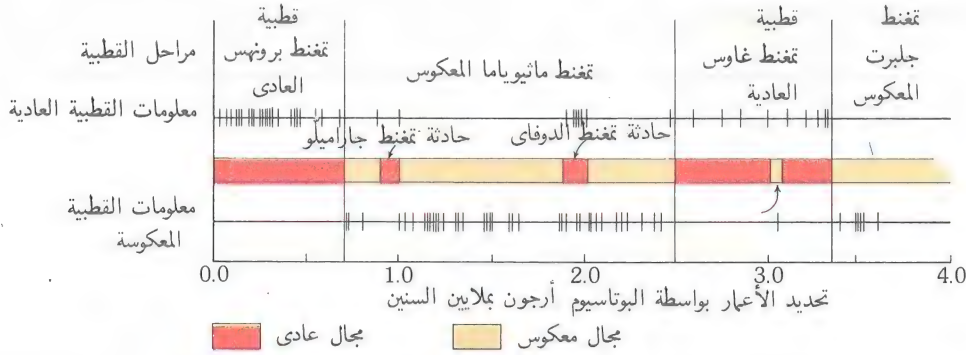


شكل 16 - 10

إنفراج قاع البحر. رأى هارى هس بأن ارتفاع الصهير على طول مرتفع وسط المحيط يكوّن قاع بحر جديد. ويحمل تيار الحمل قاع البحر مثل حزام التحويل الى خنادق أعماق البحر حيث يغور قاع البحر الى الوشاح.

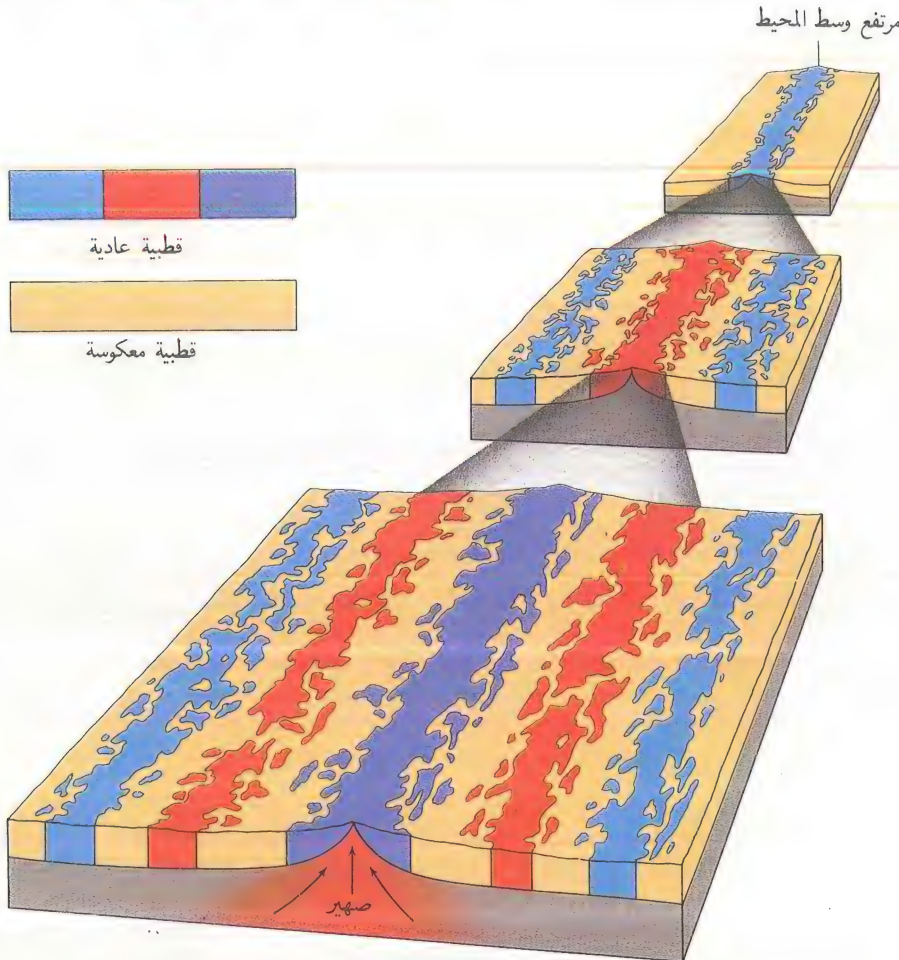
فرضية إنجراف القارات التي سبقتها والتي أهملت الأحواض المحيطية. وتركزت نظرية إنفراج قاع البحار على النشاطات التي لا تخضع للملاحظة المباشرة. فقد كتب هس يقول بأن مرتفعات وسط المحيط تقع

الاكتشافات الجديدة في أوائل الستينات في فرضية عرفت فيما بعد بفرضية انفراج قاع البحر. ولقد كان ينقص هس المعلومات التي تعزز فكرته وعليه قام بتقديم مقالته على هيئة أحاسيس نحو الأرض. وقد اختلفت آراء هس هذه عن



شكل 16 - 11

مقياس زمني للمعكوسات الرئيسية بالمغناطيسية في الماضي القريب.



شكل 16 - 12

يسجل قاع البحر الجديد قطبية المجال المغناطيسي زمن تكوّنه. وحيث أن الصخور تعمل عمل المسجل فإنها تحفظ باستمرار التغيرات في مجال الأرض المغناطيسي.

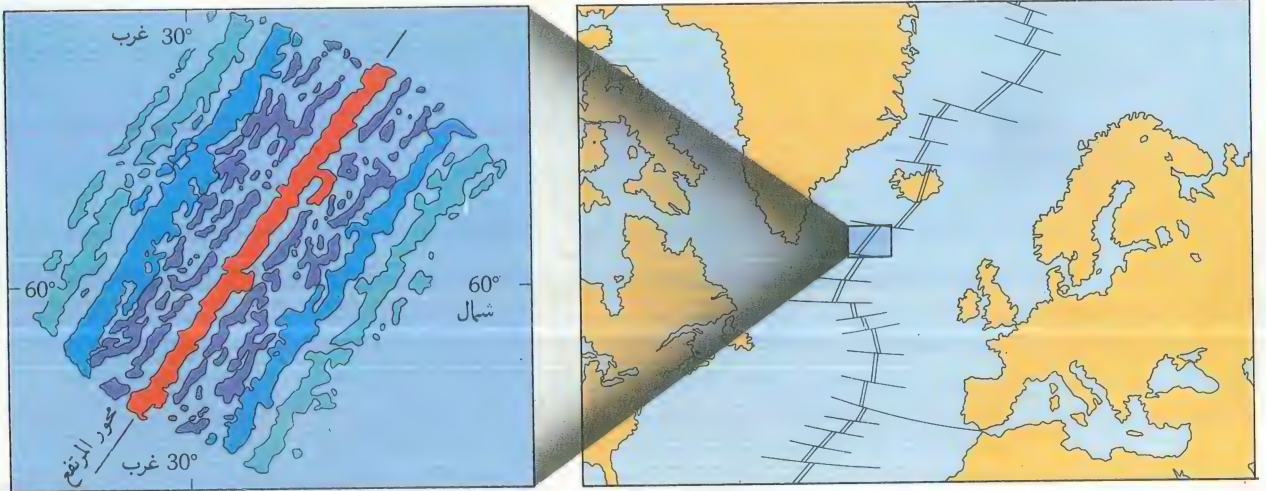
يدعى فرد فاين مع أستاذه د. ماتئوس، واللدان تكمن أهمية ما خلاصا إليه في أنها ربطا بين فكرتين لم تكن بينهما علاقة في السابق وهما: إنفراج قاع البحر وإنعكاس المغناطيسية الأرضية.

معكوسات المغناطيسية الأرضية

وفي الوقت الذى قام فيه هس ببلورة آراءه بدأ الجيوفيزيائيون فى القبول بالحقيقة التى تقول أن المغناطيسية الأرضية تعكس وضعية قطبيها دوريا أى أن القطب المغناطيسى الشمالى يصبح جنوبيا والعكس صحيح. ويعزى هذا الانعكاس الى التغير فى شدة المجال المغناطيسى. فقد دلت الحسابات الحديثة الى أن المجال المغناطيسى قد ضعف بما مقداره 5 فى المائة خلال القرن المنفرط. فإذا ما استمر الحال عليه حوالى ألف سنة فإننا نتوقع أن المجال المغناطيسى يصبح ضعيفا جدا أو ربما يتلاشى. وأثناء فترات الضعف هذه ربما تتدخل بعض القوى الخارجية مثل نشاط كُلف الشمس (البقع الشمسية) مساهمة فى إنعكاس

فوق الأجزاء الصاعدة من خلايا ضخمة من تيارات الحمل العاملة داخل الوشاح (شكل 16 - 10). وكلما انتشرت المواد الصاعدة من الوشاح جانبيا كلما أزيح قاع المحيط بعيدا عن قمة المرتفع فوق ما يشبه الحزام الناقل. وتعمل كذلك قوى الشد عند قمة المرتفع الناتجة عن التيارات المتباعدة جانبيا على فتح الطريق أمام الصهير ليقترحم مكونا قشرة محيطية جديدة. وبناء عليه كلما تحرك قاع المحيط بعيدا عن قمة المرتفع كلما حل محله قشرة محيطية جديدة. وقد قال هس أيضا بأن الأجزاء الهابطة من تيارات الحمل داخل الوشاح تقع تحت الخنادق البحرية. وبناء على ما قاله هس فإن الأجزاء القديمة من القشرة المحيطية عند الخنادق يتم استهلاكها تدريجيا داخل مكونات الوشاح. فقد قال فى ذلك أحد الباحث: لا غرو أن قاع المحيط حديث العمر فهو يتجدد باستمرار.

وبهذه الفرضية قد قام هارى هس بارساء دعائم مرحلة جديدة من الثورة العلمية. وقد جاءت الأدلة المدعمة لآراءه بعد بضعة سنين وذلك من خلال عمل طالب دراسات عليا



شكل 16 - 13

التائل فى التغيرات المغناطيسية التى وجدت عبر مرتفع ريكاجانز جنوب غربى آيسلندا وتوضح الأشرطة الملونة نطاقات تغطى اللابا فى الاتجاه العادى أما المساحة بين الألوان فتوضح التغطى المعاكس.



أ



متباعد

ب



متقارب

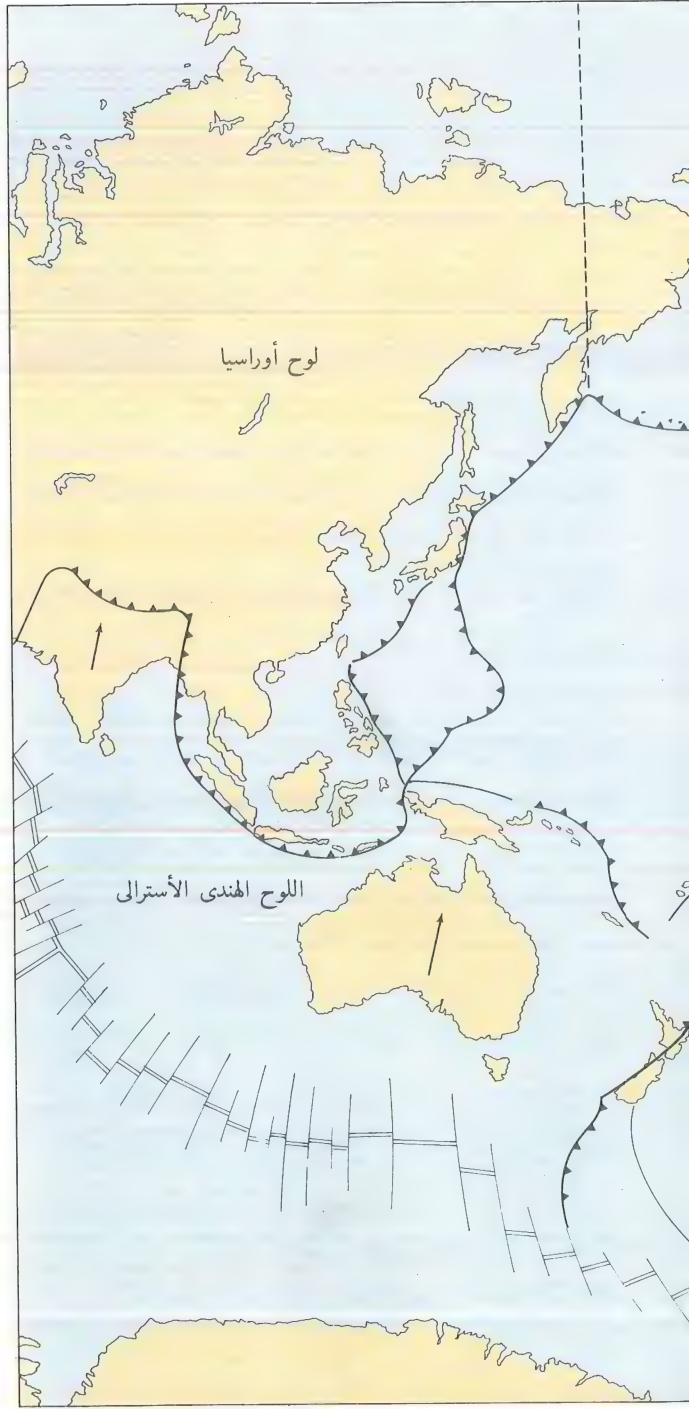
ج



فالق تحويل

المغناطيسية الأرضية. وبعد عملية الانعكاس هذه يبنى المجال المغناطيسي نفسه من جديد في وضعية عكسية. وبناء على هذه الوضعية الجديدة فإن الصخور المتكونة خلال هذه الفترة سيكون تمغنطها عكس الاتجاه لسابقتها. وعندما تحمل الصخور إتجاهاً مغناطيسياً مشابهاً للوضع الحالي يقال أن لها قطبية عادية أما الصخور ذات الاتجاه العكسي فيقال أن لها معكوس القطبية. ولقد أعيد ترتيب التاريخ القطبي لمجال الأرض المغناطيسي لعدة ملايين من السنين، وذلك باستعمال طريقة إشعاع البوتاسيوم - أرجون لتحديد الأعمار (شكل 16 - 11). ولقد وجد أن هناك علاقة مباشرة بين انعكاس المغناطيسية وفرضية إنفراج قاع المحيط عندما جُرّت أجهزة قياس المغناطيسية بواسطة سفن الأبحاث عبر جزء من قاع المحيط مقابل الشاطئ الغربى للولايات المتحدة. وقد اكتشف بأن قاع المحيط مقلّم الى أشرطة ذات شدة مغناطيسية عالية في وضع متبادل مع أخرى في شدة مغناطيسية منخفضة ذات إتجاه شمال جنوب تقريبا. ولم يرد تفسير لهذه الظاهرة حتى سنة 1963 حين ربطها قاين وماتيسوس بأفكار هس حول إنفراج قاع المحيط فقد رأى قاين وماتيسوس أن الأجزاء ذات شدة مغناطيسية عالية هي مناطق من القشرة المحيطية بها مغناطيسية ذات قطبية عادية. وبالتالي فإن هذه الصخور ذات المغناطيسية الموجبة تزيد من قوة المجال المغناطيسى الحالى. أما الأجزاء ذات شدة مغناطيسية منخفضة فهي مناطق من القشرة المحيطية بها مغناطيسية قديمة ذات قطبية معكوسة، أى أنها تضعف من المجال المغناطيسى الحالى. ولكن كيف إنتظمت هذه الأشرطة المتوازية من الصخور ذات القطبية العادية والمعكوسة عبر قاع المحيط؟

ولقد أرجع قاين وماتيسوس ذلك الى أنه عند تكوّن البازلت الجديد بقمة المرتفعات المحيطية فإنه يتمغنط بناء على المجال المغناطيسى لذلك الوقت. وحيث أن صخور جديدة تضاف بكميات متساوية تقريبا على حافتي المحيط المنفرجتين فإننا نتوقع تكوّن أشرطة صخرية متساوية الحجم



شكل 16 - 14

فسيفساء الألواح الصلبة التى تكوّن قشرة الأرض الخارجية. (أ) -
(ب) طرف متباعد. (ج) طرف متقارب. (د) طرف فوالق التحويل

المحيط وفي سنة 1968 بدأ الجيولوجيون يغيرون رأيهم حول هذه القضية فيما يشبه معكوس المغناطيسية حيث أن التفكير العلمى أصبح الى جانب فكرة الأرض المتحركة.

حركة الألواح: تقديم جديد لفكرة قديمة

بحلول سنة 1968 تم توحيد فكرتى إنجراف القارات وإنفراج قاع المحيط في نظرية عرفت بحركة الألواح. فمضمون هذه النظرية يمكن إعتباره الاطار الذى يمكن من خلاله تناول معظم الظواهر الجيولوجية. وعلى اعتبار أن هذه الفكرة جديدة نسبيا فمن البديهي تعديلها وتطويرها حسب ما يستجد من معلومات. ولكن يبدو أنه لا غبار على جوهرها وسنقوم هنا بتقديمها بوضعها الحالى.

وتقول نظرية حركة الألواح أن غلاف الأرض الصخرى الجامد مكوّن من عدّة أجزاء تسمى الألواح. وقد تمّ التعرف على حوالى عشرين لوحا وذلك بأحجام مختلفة (شكل 16 - 14). واكبر هذه الألواح ما يعرف باللوح الهادى والذى يقع في معظمه داخل المحيط الهادى، فيما عدى جزء بسيط حيث يقع بأمريكا الشمالية والذى يشمل منها جنوب ولاية كاليفورنيا وشبه جزيرة باها. لاحظ من الشكل 16 - 14 أن معظم الألواح الضخمة الأخرى تحتوى على قشرة محيطية الى جانب القشرة القارية. ويناقض هذا ما جاءت به نظرية الانجراف القارى والتي تقول أن القارات قد تحركت عبر المحيطات ولم تقل أنها تحركت مع قاع المحيطات. أما معظم باقى الألواح الصغيرة فإنها تتكون من مادة محيطية مثل لوح النازكا الذى يقع مقابل الشاطئ الغربى لأمريكا الجنوبية. وبالرغم من أن الشكل لا يوضح اللوح الصغير الذى ينطبق تقريبا على تركيا إلا أن هذا اللوح يقع في مجمله داخل أحد القارات.

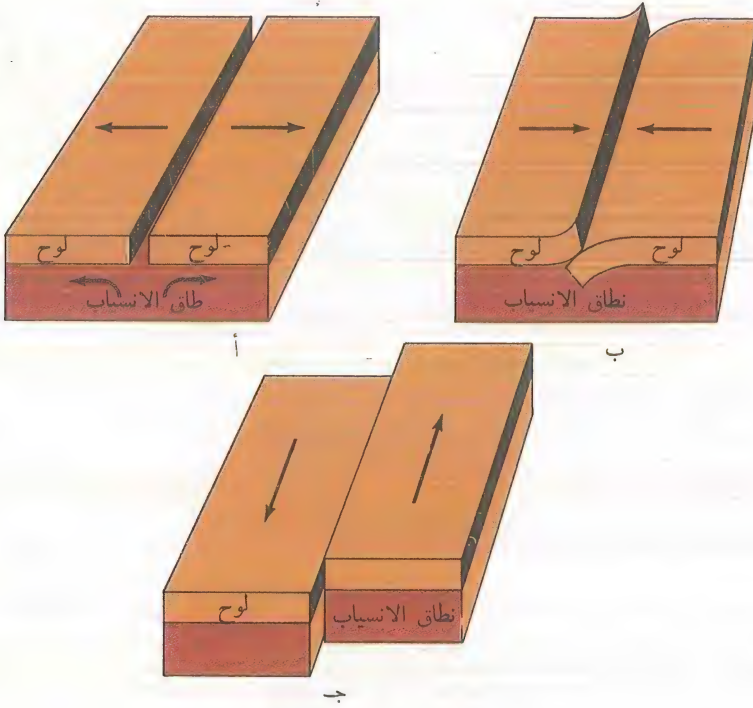
ويقع الغلاف الصخرى للأرض فوق النطاق الوهن، وهو جزء مكوّن من مادة لدنة ذات درجة حرارة عالية، وعليه فإن الألواح بالغلاف الصخرى مدعومة من تحتها بمادة لدنة

والقطبية في وضع موازى لجانبى المرتفع المحيطى (شكل 16 - 12). وقد كان هذا التفسير للأشرطة الصخرية المتبادلة من القطبية العادية والمعكوسة والتي تمثل وجهى مرآة عبر المرتفعات المحيطية، أقوى دليل قدم مدعما لفكرة إنفراج قاع المحيط

وبعد مدة قصيرة قام فريق من المرصد الجيولوجى لجامعة كولومبيا بدراسة كانت نتائجها مدعمة لمقترح فاين وماثيوس. فقد وجد هؤلاء الباحثون من خلال جرّهم لأجهزة قياس مغناطيسية فوق جزء من مرتفع الريحانيس جنوب أيسلاند أن التباين المغناطيسى متماثل حيث يمثل المرتفع قمة تلك المنظومة (شكل 16 - 13). وبحلول سنة 1968 وجد أن هذا التماثل موازٍ لمعظم المرتفعات المحيطية.

والآن بعد أن تم تعيين أعمار معظم المعكوسات المغناطيسية الحديثة أمكن أيضا تحديد معدل الانفراج بالمرتفعات المحيطية بدقة متناهية. فأشرطة قاع المحيط الهادى مثلا اكبر بكثير من نظائرها لنفس الفترة الزمنية بالمحيط الأطلسى. وهذا يعنى أن معدل الانفراج بمنصف المحيط الهادى أسرع من معدل الانفراج بالمحيط الأطلسى. وعند استعمال الأعمار المطلقة لهذه الأحداث المغناطيسية فإننا نجد أن معدل الانفراج بمرتفع وسط شمال الأطلسى يبلغ 1 أو 2 سنتيمترا في السنة (لاحظ أن كل جانب من المرتفع ينفرج بنفس المعدل). أما المعدل بجنوب المحيط الأطلسى فإنه أكبر بقليل من هذه القيمة. ويتراوح معدل الانفراج بمرتفع شرقى المحيط الهادى بين 3 و 8 سنتيمترات سنويا، وبمعدل أقصى يبلغ 10 سنتيمترات في السنة في جزء منه. وعليه فإن فاين وماثيوس لم يكتشفا شريطاً مسجلاً لتفاصيل التغيرات المغناطيسية لمجال الأرض فحسب، ولكن أمكن استعمال هذا التسجيل أيضاً لتقدير معدل إنفراج قاع المحيط

وهناك إتفاق عام الآن على أن المغناطيسية القديمة تعتبر أكثر الأدلة إقناعا لفكرتى إنجراف القارات وإنفراج قاع



شكل 16 - 15

رسم تخطيطي لأطراف الألواح.

(أ) - طرف إنفراجي.

(ب) - طرف تقارب.

(ج) - طرف فوالق التحويل.

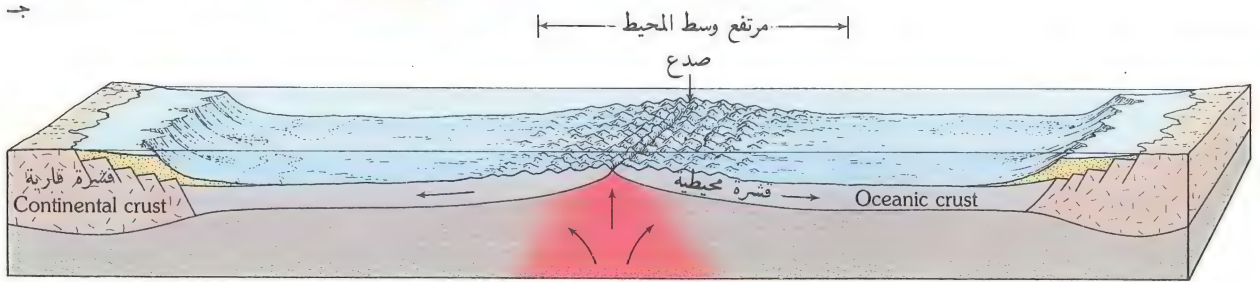
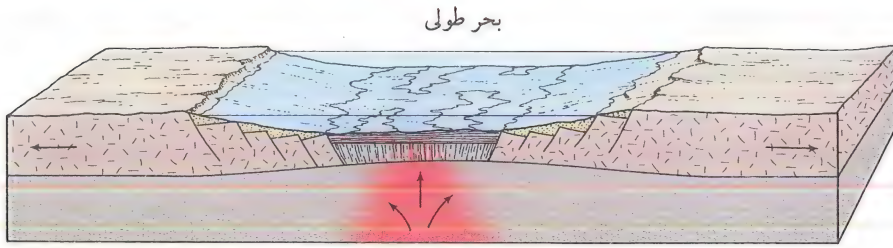
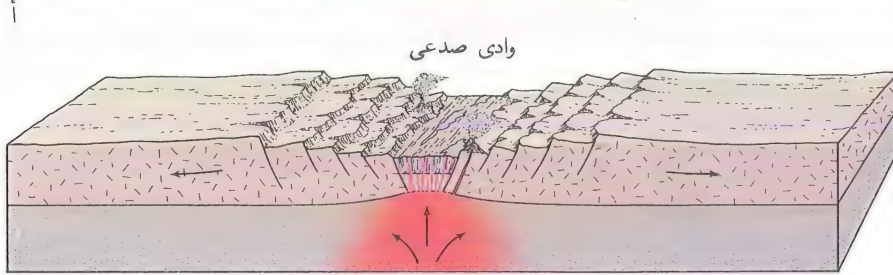
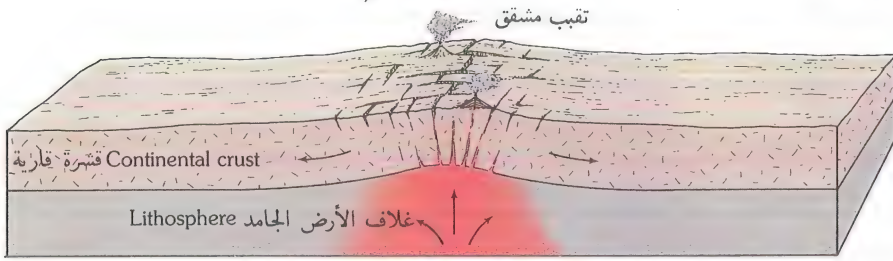
حواف الألواح

لقد عرفت النشاطات الحركية أو التكتونية للأرض لمدة من الزمن بنطاقات ضيقة ومحددة مثل التي تسمى بحلقة النار والتي تحيط بالمحيط الهادى. وبناء على ذلك فقد اعتمد في البداية على توزيع الزلازل والنشاط البركانى في تحديد مواقع حواف الألواح. وقد تبين فيما بعد أن هناك ثلاثة أنماط من حواف الألواح يتميز كل منها بحركة مختلفة (شكل 16 - 15) وهى:

- 1 - حواف متباعدة حيث تتحرك الألواح بعيدا عن بعضها، مما ينجم عنه خروج مواد من الوشاح لتكوّن قاعاً بحرياً جديداً.
- 2 - حواف متقاربة حيث تتحرك الألواح تجاه بعضها مما ينتج عنه إستيعاب جزء من الغلاف الصخري داخل الوشاح باستمرار وذلك أثناء إنحدارها تحت اللوح المجتاز.
- 3 - حواف فوالق التحويل حيث تنزلق الألواح قبالة

بالنطاق الوهن. ويبدو أن هناك علاقة بين سمك ألواح الغلاف الصخري وطبيعة مادة القشرة الأرضية التي تعلوها. وعموما فإن الألواح أقل سمكا تحت المحيطات حيث يتراوح سمك الألواح المحيطية بين 80 و 100 كيلومتر في الوقت الذى تزيد فيه الألواح القارية على 100 كيلومتر وقد تبلغ الأربعمائة كيلومتر في بعض المناطق.

ومن أحد معتقدات نظرية حركية الألواح أن كل لوح يتحرك كوحدة مستقلة نسبة الى بقية الألواح. ويعتقد أن السلوك الحركي للصخور داخل النطاق الوهن يسمح بحركة الألواح بقشرة الأرض الخارجية الصلبة. ومع حركة الألواح تبقى المسافة بين منطقتين أو مدينتين ثابتة وذلك على نفس اللوح بينما تتغير هذه المسافة باستمرار إذا كانت هاتين النقطتين تقعان على لوحين مختلفين. وحيث أن كل لوح من هذه الألواح يتحرك كوحدة مستقلة فإن معظم آثار هذه الحركة تقع عند حواف الألواح، وعليه فإن معظم النشاط الاهتزازي للأرض والتبركن وعملية بناء الجبال تقع على طول حواف الألواح.



شكل 16 - 16

(أ) - ارتفاع الصهير الى اعلى يسبب في عدة تشققات في الغلاف الجامد. (ب) - مع شد القشرة بعيدا عن بعضها تقوص مسطحات كبيرة من الصخور مكونة نطاقا صدعيا. (ج) - المزيد من الانفراج يكون بحرا ضيقا. (د) - في النهاية يتكون محيط ومرتفع بوسطه.

الثلاثة باختصار. وستتناول في الفصلين التاليين دور هذه الحواف في إنفراج قاع البحر وبناء الجبال وذلك بتفصيل أكثر.

بعضها البعض دون إستحداثها أو تحطيمها للغلاف الصخري. وستعرض في المقاطع التالية الى طبيعة هذه الحواف

الحواف المتباعدة

الصدعى العظيم بشرقى أفريقيا مثال جيد لمشل هذه الظاهرة (شكل 17 - 20). وإذا ما استمرت عملية الانفراج بشرقى أفريقيا، فإن هذا الوادى سيزداد فى طوله وعمقه حتى يصل الى المحيط وفى هذه الحالة يصبح الوادى بحرا ضيقا يفتح فى المحيط مشابها فى ذلك البحر الأحمر اليوم (شكل 16 - 16 ج). وسيبقى نطاق التصدع موقعا للنشاط النارى ومصدرا مستمرا لأجزاء جديدة من قاع المحيط (شكل 16 - 16 د).

ويبدو أن الوادى الصدعى العظيم بشرق أفريقيا مرحلة بدائية لانشطار القارة (شكل 17 - 20). وتمثل الجبال البركانية الكبيرة، مثل جبل كيليانجارو وجبل كينيا، النشاط البركانى الكبير الذى يعتقد أنه يصاحب مثل هذا الانشطار. وإذا ما استمر الوادى الصدعى نشطا فإن شرقى أفريقيا سينفصل عن القارة كما حصل لشبه الجزيرة العربية منذ بضع ملايين من السنين. ولا تصل فى جميع الأحوال الوديان الصدعية الى مرحلة تكون فيها مركزا إنفراجيا. ففى وسط الولايات المتحدة مثلا يوجد نطاق صدعى خامل يمتد من بحيرة السوييريور الى كانسس. وقد امتلأ هذا الوادى الذى كان نشطا فى السابق بالصخور المندفعة خلال القشرة الأرضية أكثر من 500 مليون سنة مضت. لماذا تبقى بعض الأودية الصدعية نشطة بينما تتوقف أخرى عن نشاطها؟ هذا ما لا نعلمه حتى الآن.

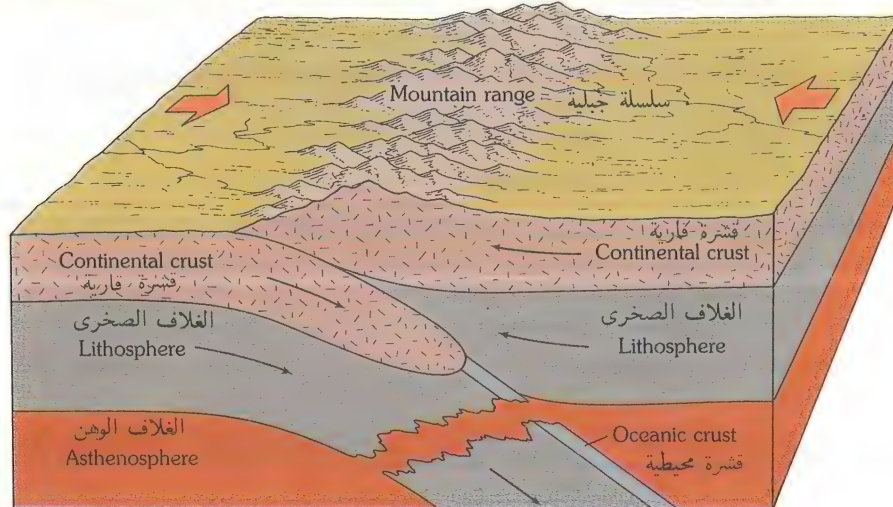
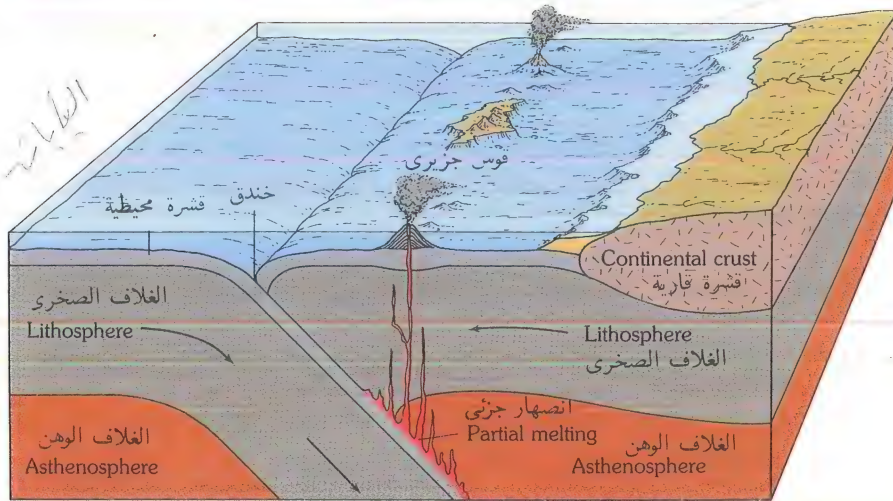
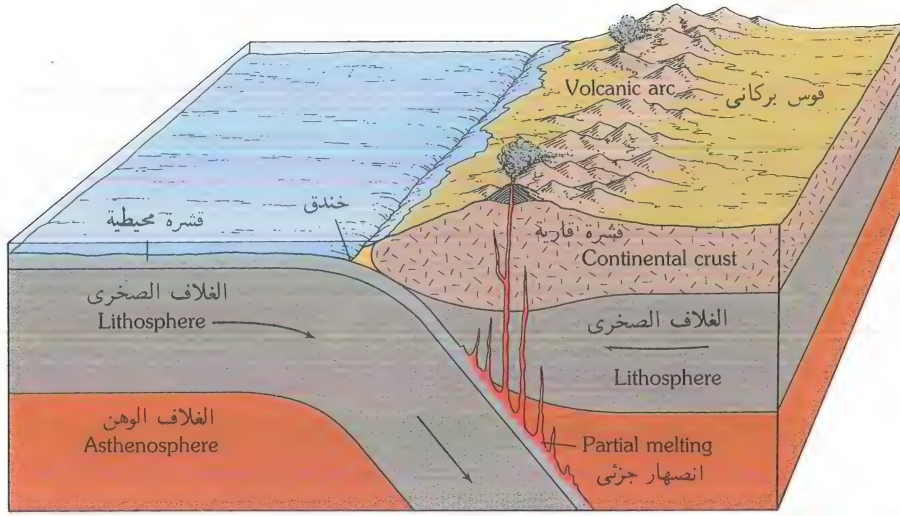
الحواف المتقاربة

تتكون وباستمرار عند مراكز الانفراج إضافات جديدة لغلاف الأرض الصخرى، وحيث أن مساحة سطح الأرض الكلية ثابتة لا تغير فإن هذا الغلاف لا بد وأنه يستهلك بنفس المعدل. وقد وجد أن نطاق تقارب الألواح هو الموقع الذى يستهلك فيه غلاف الأرض الصخرى. فعند إرتطام لوحين تنشئ حافة أحدهما وتغوص تحت الأخرى. وعند دخول مقدمة اللوح الى النطاق الوهن الساخن ترتفع درجة حرارتها وتفقد تماسكها. وعادة ما يكون طرف اللوح الغائر

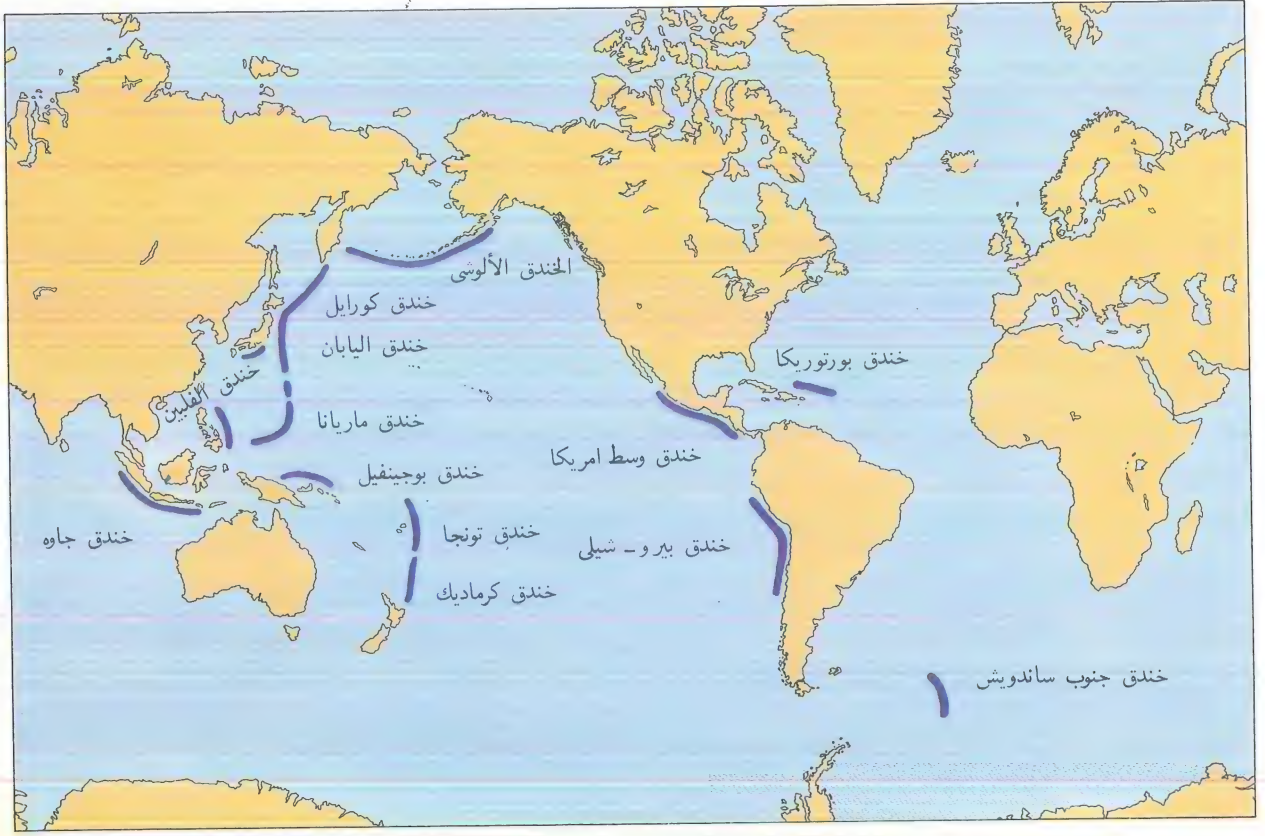
تقع الحواف المتباعدة وهى مواقع إنفراج قاع البحر عند قمم مرتفعات وسط المحيط ويقوم هنا صهير الصخور المتصاعد من النطاق الوهن الساخن بملء الفراغ الناجم عن تباعد الألواح عن محور المرتفع. وتبرد هذه المادة ببطء مكونة جزءاً جديداً من قاع البحر. وتستمر عملية التباعد وحقن الصهير لتضيف الى القشرة المحيطية (الغلاف الصخرى) أجزاء جديدة، وكما سبق وأن أشرنا الى أن هذه الميكانيكية تسمى إنفراج قاع البحر وهى التى كونت قاع المحيط الأطلسى خلال 160 مليون سنة مضت.

وليس كل مراكز الانفراج بقدم مرتفع وسط المحيط الأطلسى. ولا توجد جميعها بمنتصف محيطات واسعة. فيعتقد بأن البحر الأحمر مثلا هو موقع لحواف متباعدة تكونت حديثا حيث انفصلت شبه الجزيرة العربية عن أفريقيا وبدأت فى الحركة تجاه الشمال الشرقى. وبناء عليه قد يعطى البحر الأحمر للمتخصصين فى علوم البحار فكرة عما كان عليه المحيط الأطلسى بداية تكوينه. وهناك نتيجة أخرى ملموسة لانفراج قاع البحر وذلك خلال الزمن الجيولوجى الحديث، ألا وهى خليج كاليفورنيا.

وعند تكون مركز إنفراج داخل أحد القارات فقد يتسبب فى إنشطارها الى أجزاء صغيرة وذلك كما ذكر واغتر فى تصويره لانشطار البنجيا. ويعتقد أن انقسام قارة ما يبدأ بصعود صخور ساخنة من تحتها مما يجعل القشرة الأرضية تنشى الى أعلى فوق ذلك الموقع. وتتكون عدة شقوق شد كرد فعل لتمدد القشرة عند تقبيها، كما هو مبين بالشكل 16 - 16 أ. وبانتشار المواد الساخنة المرتفعة جانبا نسبة الى موقع صعودها تبدأ عملية شد أجزاء الغلاف الصخرى بعيدا عن بعضها. وبالتدرج تنزلق الأجزاء المكسورة وتغوص فى الفراغات التى أحدثتها الألواح المتباعدة (شكل 16 - 16 ب). وتسمى وديان المنخفضات الضخمة المتكونة نتيجة للتصدع أثناء هذه العملية بوديان الصدوع. ويعتبر الوادى



شكل 16 - 17
نطاقات تقارب الألواح.
(أ) - محيطية وقارية.
(ب) - محيطية - محيطية.
(ج) - قارية - قارية.



شكل 16 - 18

توزيع خنادق العالم البحرية.

بنطاق الغوص. وبانزلاق اللوح المحيطى تحت اللوح الذى يعلوه ينشئ اللوح المحيطى مكونا خندق أعماق البحار وذلك بمحاذاة نطاق الغور (شكل 16 - 17 أ). وقد يبلغ طول الخنادق المكونة بهذه الطريقة آلاف الكيلومترات ويتراوح عمقها بين 8 و 11 كيلومترا (شكل 16 - 18).

التقارب المحيطى - القارى: عند إرتطام مسطح محيطى بكتلة قارية فإن القشرة المحيطية تنثنى وتغوص فى النطاق الوهن (شكل 16 - 17 أ). وأثناء نزول المسطح المحيطى تقوم الكتلة القارية من فوقها بكشط ما يعلوه من رسوبيات غير متماسكة. فقد دلت الدراسات التى أجريت بالشواطئ الغربية للمكسيك موقع غوص طرف لوحة الكوكس بأن حوالى نصف الرسوبيات تتم إزالتها بهذه الوسيلة. وبناء

بارداً نسبة الى ما حوله داخل النطاق الوهن وبسمك يبلغ حوالى 100 كيلومتر أحيانا. وعليه فقد يصل هذا الجزء الغائر الى عمق 700 كيلومتر حسب زاوية الميل قبل أن يستوعب بالكامل داخل الوشاح العلوى.

وحيث أن جميع النطاقات المتقاربة متشابهة فى الأساس فإن طبيعة إرتطام الألواح تتأثر بنوعية مادة القشرة الأرضية. فقد يحدث الارتطام بين لوحين محيطيين أو لوح محيطى والآخر قارى أو بين لوحين قاريين كما هو موضح بالشكل 16 - 17. فكلما إلتقت حافة لوح تعلوه قشرة قارية بأخرى محيطية فإن المواد القارية الأقل كثافة تبقى دائما طافية بينما يغوص طرف القشرة المحيطية الأكثر كثافة فى النطاق الوهن. ويسمى الموقع الذى تغوص فيه الألواح المحيطية

من خندق محيطى، حيث لا تزال عملية غور الغلاف الصخرى نشطة. ويلاحظ أن بمحاذاة أقواس الجزر المذكورة أعلاه يقع كل من خندق الأيلوشى وخندق الماريانا وخندق التونجا على التوالي.

وعلى مدى زمنى طويل من النشاط البركانى تتراكم أكوام بركانية هائلة على قاع المحيط مما يساعد مع طفوية الصخور النارية النابطة داخل القشرة الأرضية على زيادة حجم وارتفاع الأقواس المتكونة. ويزيد هذا النمو بالتالى كمية الرسوبيات المتراكمة بعوامل التعرية على قاع البحر. وقد تصل هذه الرسوبيات الخنادق البحرية مما يجعلها تتحول وتشكل تحت قوة الضغط الناتجة عن جهد الألواح المتقاربة. وينتج عن هذه النشاطات المختلفة قوس جزر ناضج مكون من صخور بركانية مطوية ومتحولة وصخور نارية نابطة، ومثال ذلك شبه جزيرة ألاسكا والفلبين واليابان.

التقارب القارى - قارى: عند إرتطام لوحين يحملان قشرة قارية فإن كلاهما لا يغور تحت الآخر (شكل 16 - 17 ج). ويعتقد أن ذلك ناتج عن خفة مكوناتها الصخرية الرسوبية وبالتالي طبيعة طفوتها. ويعتقد أن مثل هذه الظاهرة قد حدثت عند إرتطام قارة الهند التى كانت منفصلة بقارة آسيا مكونة جبال الهيمالايا التى ربما كانت أروع سلاسل العالم الجبلية جمالا. وأثناء هذا الارتطام إنشنت القشرة القارية وتشققت وقصرت فى طولها. وإلى جانب جبال الهيمالايا يعتقد أن العديد من السلاسل الجبلية الأخرى قد تكونت بارتطام الألواح القارية مثال الألب والأبالاش والأورال.

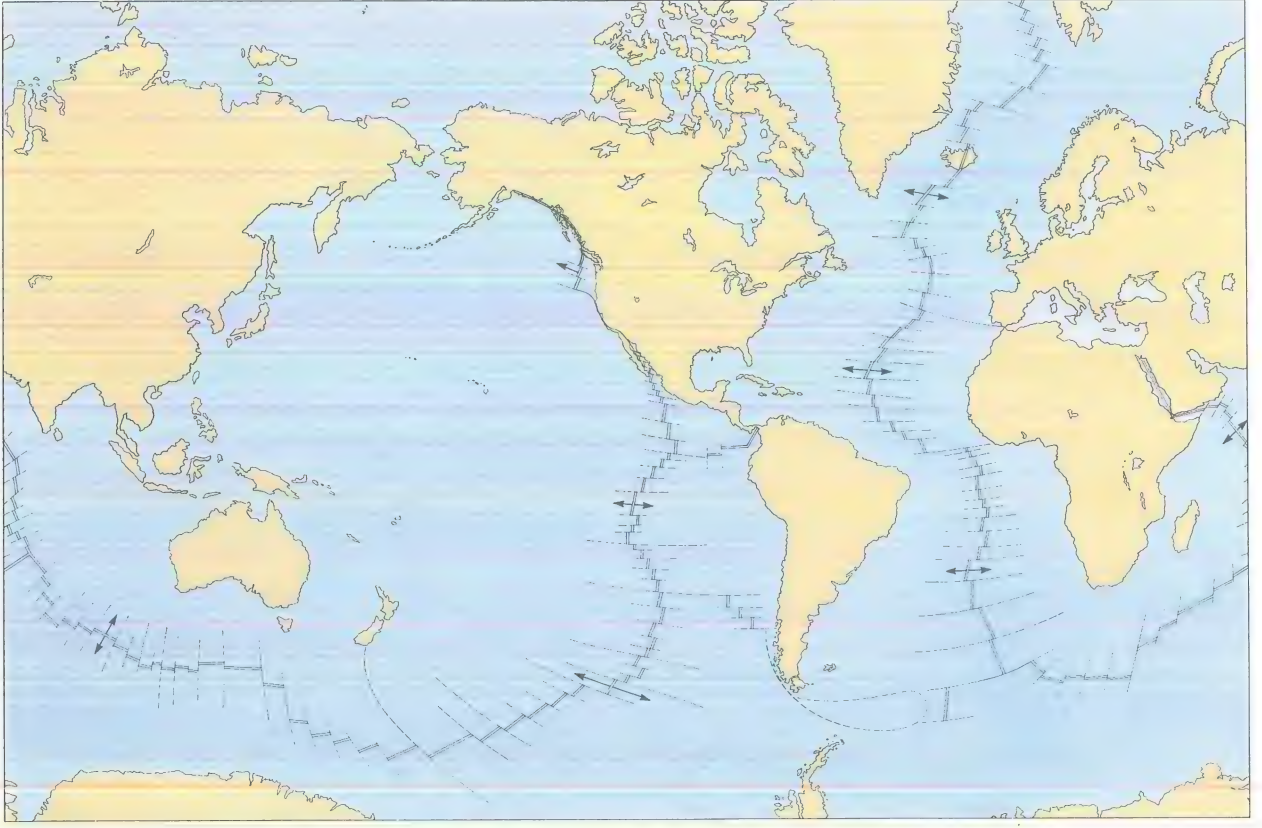
وقبل ارتطام القارات كانت الكتل القارية المعنية تفصل بينها قشرة محيطية تكونت أثناء فترة سابقة من الانفراج المحيطى. ومع تقارب الكتلتين القاريتين يغور قاع البحر الذى كان يفصل بينهما تحت أحد اللوحين. ويكون الانصهار الجزئى للمسطح المحيطى الغائر هذا مع الرسوبيات التى تعلوه قوس بركانى. ويجدد موقع نطاق الغور

عليه نجد أن مثل هذه الظاهرة تضيف المزيد من الرسوبيات المتراكمة على طول القارة نتيجة لعوامل التعرية.

ومع هبوط اللوح المتحرك ودخوله النطاق الوهن الساخن فإن مكوناته وما يحمله من رسوبيات مشبعة بالماء تبدأ فى الانصهار. وبالرغم من أن هذه العملية غير مفهومة التفاصيل إلا أن الانصهار الجزئى لهذا الخليط من الصخور البازلتية والرسوبيات يعطى صهيرا مائلا لصخور الأنديسيت أو الجرانيت أحيانا. وحيث أن الصهير الناتج يكون أقل كثافة من صخور الوشاح، فإن هذه المكونات تبدأ بالصعود تدريجيا حال تراكم كميات كافية منها. ومعظم الصهير الصاعد يبرد ويتبلر عند أعماق تبلغ عدة كيلومترات. أما الباقي فقد يخرج على السطح لينتج عنه تفجرات بركانية أحيانا. ويعتقد أن الأجزاء البركانية بجبال الأنديز قد تكونت بهذه الطريقة عند إنصهار لوح النازكا أثناء نزوله تحت قارة أمريكا الجنوبية (شكل 16 - 14). وما الزلازل المتكررة الحدوث بجبال الأنديز إلا دليل على النشاط الذى يحدث عند الأعماق بعيدا عن أبصارنا.

وتسمى الجبال التى يعتقد أنها تكونت جزئيا بنشاط بركانى مصاحب لنطاق الغور مثل جبال الأنديز بالأقواس البركانية. وتوجد مثل هذه الأقواس فى بقاع أخرى من العالم.

التقارب المحيطى - المحيطى: عند إرتطام مسطحين محيطيين يغوص طرف أحدهما تحت الآخر متسببا فى نشاط بركانى يشبه ذلك الذى يحدث عند إرتطام لوح محيطى بأخر قارى. غير أن مثل هذه البراكين تحدث فى قيعان المحيطات بدلا من حدوثها على اليابسة (شكل 16 - 17 ب). وإذا ما إستمرت هذه النشاطات البركانية فإن كتلاً من اليابسة قد تبرز من أعماق المحيطات. وفى البداية تكون مثل هذه الظاهرة على هيئة سلسلة من الجزر البركانية تسمى بقوس الجزر. وجزر الأيلوشى والماريانا والتونجا مثال لذلك. وعادة ما تقع أقواس الجزر على بعد بضع مئات من الكيلومترات



شكل 16 - 19

العلاقة بين مرتفعات وسط المحيط وفوالق التحويل. المواقع التي تعمل فيها فوالق التحويل على قطع استمرارية المرتفعات ييسر للأخيرة تغيير اتجاهها (تنشئ) كما يتضح بالمحيط الأطلسي.

تتفصل عن الكتلة القارية مستمرة في حركتها الى أسفل حتى تستوعب بكاملها داخل الوشاح، غير أن الغلاف الصخري القاري تحت تأثير طفويته لا ينتقل بعيدا داخل الوشاح. ففي حالة الهيايالا قد دُفِعَتْ مقدمة لوح الهند جزئيا تحت آسيا لتكوّن قشرة قارية سميقة، مما يُعزّي إليه إرتفاع جبال الهيايالا الشاهقة وهضبة التبت شمالا.

فوالق التحويل

والنوع الثالث من حواف الألواح هو فوالق التحويل التي تتواجد عند مواقع إنزلاق الألواح بمحاذاة بعضها البعض دون تكوين قشرة جديدة كما هو الحال عليه عند

مكان إنبثاق القوس البركاني على أحد الكتلتين القاريتين. وإذا ما كان نطاق الغور على مسافة كافية داخل المحيط قد يتكون قوس جزر جديد. وعلى كل حال فإن تعرية القوس البركاني حديث التكوّن سيزيد كميات ضخمة من الرسوبيات على تلك المحمولة على الحواف القارية. ومع إنتهاء القشرة المحيطية التي تفصل القارتين ترتطم هاتان الكتلتان حيث تضغط على الرسوبيات بينهما لثنيها وتعيد تشكيلها كما لو أنها وضعت بين فكي مُلْزَمة ضخمة، مما ينتج عنه تكوّن سلسلة جبلية جديدة من الصخور الرسوبية المشكلة ومن أجزاء القوس البركاني. وبعد ارتطام القارات يعتقد بأن المواد المحيطية الهابطة

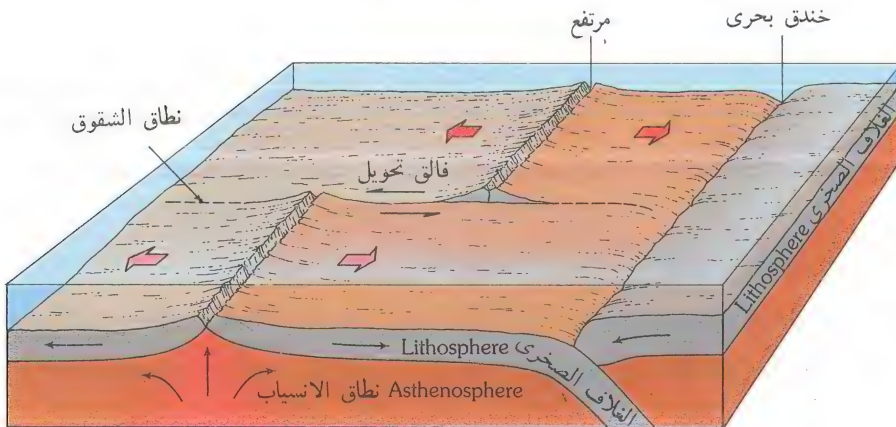
مرتفعات وسط المحيط تُدون تحطم القشرة أيضا كما يحدث عند الخنادق البحرية. وتوازي فوالق التحويل تقريبا اتجاه حركة الألواح. وقد تم التعرف عليها في البداية من تقاطعها لمرتفعات وسط المحيط (شكل 16 - 19). وتبدو هذه التشققات الضخمة من أول وهلة على أنها فوالق مضيئة إنزلاقية بسيطة أثرت حركتها الأفقية في تفاوت أجزاء مرتفعات وسط المحيط غير أن الحركة النسبية على طول نطاقات هذه الفوالق وجد أنها في الاتجاه المعاكس لما يتطلبه هذا التفاوت.

وقد اكتشف ج. ولسون من جامعة تورونتو بكندا سنة 1965 الطبيعة الحقيقية لفوالق التحويل. فقد قال ولسون أن هذه التشققات الضخمة قد ربطت أحزمة الأرض النشطة بشبكة قسمت القشرة الأرضية إلى عدة ألواح متاسكة. وعليه فقد كان ولسون أول من اقترح بأن الأرض مكونة من عدة ألواح وفي نفس الوقت تعرف على نطاقات الحركة النسبية بين هذه الألواح. وبهذه الطريقة تكون فوالق التحويل هي الوسيلة التي تنتقل بها القشرة المحيطية من موقع تكونها بقمة المرتفعات المحيطية إلى مواقع تحطمها بالخنادق البحرية كما هو موضح بالشكل 16 - 20. لاحظ أن لوح جوان دوفوكا يتحرك في اتجاه الجنوب الغربي ليهبط تحت الشاطئ الغربي للولايات المتحدة. ويحد هذا اللوح



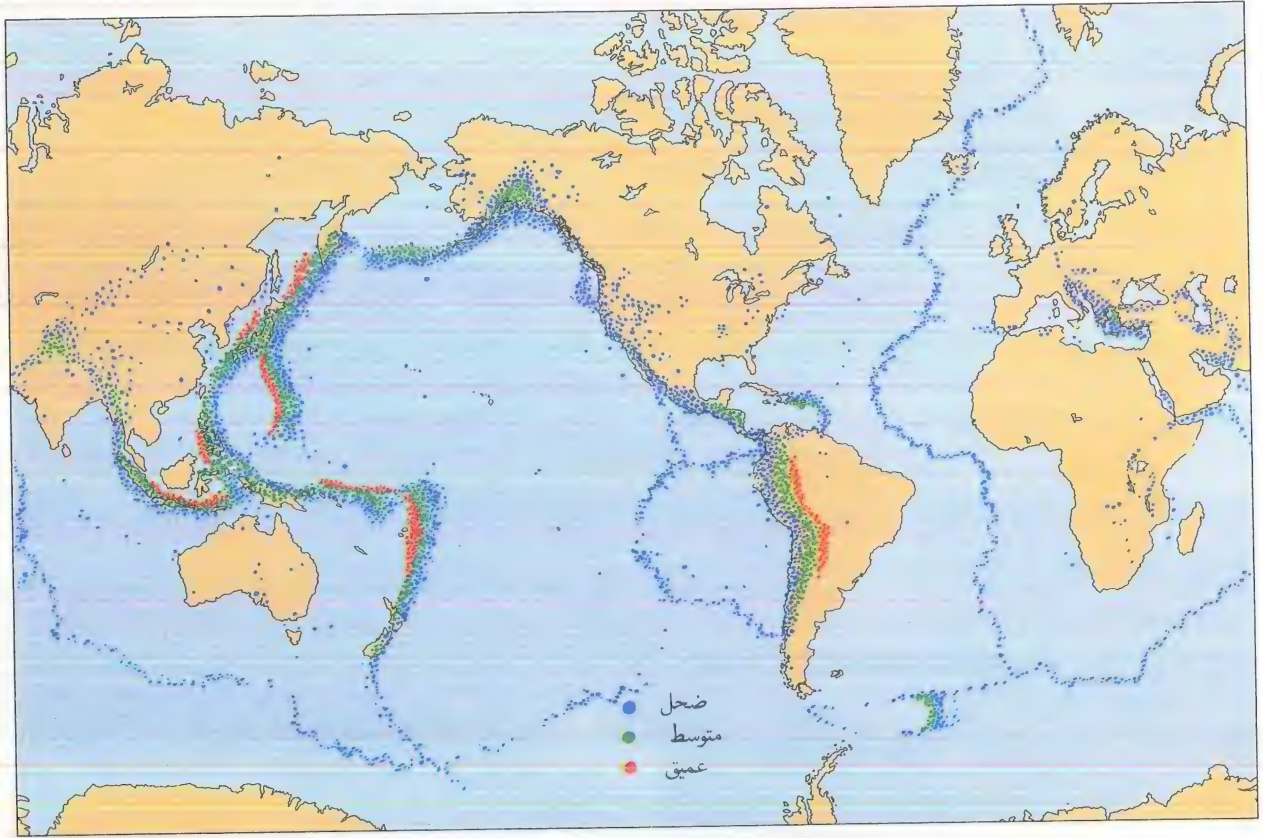
شكل 16 - 20

دور فوالق التحويل في حركة الألواح النسبية. يسمح جرف مندوسينو بحركة قاع البحر الذي يتكون عند مرتفع جوان دوفوكا في الاتجاه الجنوب شرقي متجاوزا اللوح الهادي.



شكل 16 - 21

غالبا ما تصل الفوالق المحولة بين أجزاء المرتفعات المنفصلة. لاحظ أن الغلاف الصخري يتحرك في اتجاهين متعاكسين بين المرتفعين بينما يتحرك في نفس الاتجاه في المواقع الأخرى.



شكل 16 - 22

توزيع الزلازل: ضحلة ومتوسطة وعميقة المركز.

الانفراج يمكن أن يتحول إلى تقارب عند نطاق الغور، وحيث أن فوالق التحويل تربط الحواف المنفرجة بالحواف المتقاربة في تركيبات متباعدة فإن التغيرات الأخرى في حركة الألواح النسبية يمكن أن تحدث على طول فوالق التحويل.

فكثير من الأحيان نجد أن فوالق التحويل تربط بين مرتفعين أو حتى أحيانا بين خندقين بحريين. فعندما تربط فوالق التحويل بين مركزي إنفراج كما هو مبين بالشكل 16 - 21، فإن قاع البحر الجديد يتحرك في اتجاهين عكسيين وذلك في المنطقة بين المرتفعين. وفي الأماكن الأخرى على طول هذا النطاق الصدعي نجد أن الحركة النسبية تتغير بحيث يتحرك اللوحان في اتجاه واحد. وعليه فإن الجزء النشط

الصغير نسبيا من الجنوب واجهة مندوسينو الجبلية تحت البحرية. ويصل حد هذا الفالق مركز إنفراج نشط بنطاق غور. أي أن الفالق قد مكن القشرة المتكونة عند قمة المرتفع من الحركة إلى مثواها تحت قارة أمريكا الشمالية. لاحظ أنه في الوقت الذي يتحرك فيه لوح جوان دو فوكا في اتجاه الجنوب الشرقي فإن الحركة على طول فالق أو صدع سان أندرياس مكنت اللوح الهادي من الانجراف تجاه الشمال الغربي بما في ذلك جزء من كاليفورنيا.

وقد سمى ولسون هذه الفوالق بفوالق التحويل لأن الحركة النسبية للألواح يمكن أن تتغير أو تتحول على طولها. وكما رأينا من المثال السابق كيف أن التباعد عند قمة مركز

في تفسير كنه توزيع النشاط الزلزالي حول العالم، (شكل 16 - 22). وقد قام بالذات هؤلاء المتخصصون في علم الزلازل بتفسير وجود الزلازل ذات المراكز العميقة وعلاقتها بالخنادق البحرية وأقواس البراكين، كما أن عدم وجود مثل هذه الزلازل على طول مرتفعات وسط المحيط ينسجم وهذا النموذج الجديد.

وقد سبق أن أوضحنا في الفصل السابق أن هناك علاقة مباشرة بين حواف الألواح والزلازل. ويلاحظ أن هذه العلاقة أكثر وضوحاً في مناطق الخنادق البحرية حيث تفوق مسطحات من الغلاف الصخري إلى الوشاح. فقد وجد أن هناك تناسق واضح بين مواقع المراكز الزلزالية داخل الخنادق البحرية وأعماق مراكزها (شكل 16 - 23). لاحظ أن معظم الزلازل الضحلة تكون قريبة من الخنادق البحرية، بينما تقع الزلازل العميقة والمتوسطة المركز بعيداً عنها، حيث



شكل 16 - 23
توزيع مراكز الزلازل حول خندق اليابان البحري.

الوحيد من الفالق هو الذي يقع بين جزئي المرتفع المنفصلين. ويتميز هذا النطاق النشاط أيضاً ببعض الحركة الاهتزازية الضعيفة.

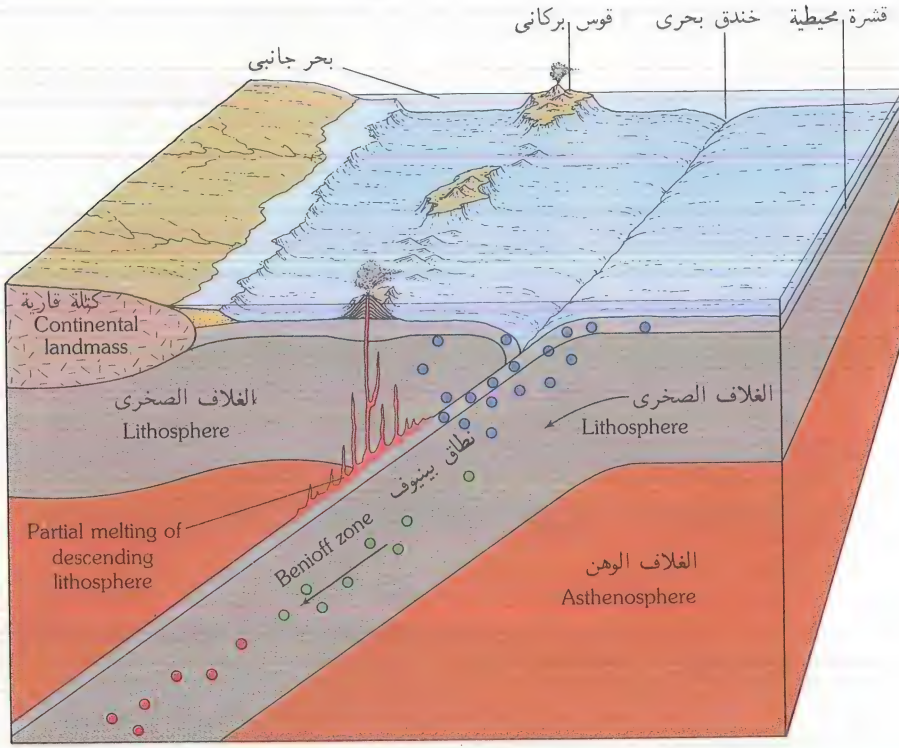
إختبار النموذج

بعد إقتراح نظرية حركية الألواح مباشرة بُدِءَ في جمع قدر هائل من البيانات من فروع علوم الأرض، وذلك لاختبار هذه الفكرة الجديدة. وبالتأكيد فإن النموذج الذي قُلمَ سيتم تعديله ليتناسب والمعلومات الوفيرة حول الموضوع، غير أنه يبدو أن أساس النظرية صحيح ولا غبار عليه وهو قادر على الثبات بمرور الزمن.

وبالرغم من أن معظم الجيولوجيين قد قبلوا بهذه النظرية بحماس إلا أن هناك رفض دائم للنظرية برمتها أو على الأقل لجزء منها. ولقد تمّ التعرض في هذا الفصل لبعض الأدلة المدعمة لنظريتي إنجراف القارات وإنفراج المحيطات أوقاع البحر، وسنأتى بالإضافة إلى ذلك على ذكر المزيد من هذه الأدلة وربما جدير بالذكر هنا أن كثيراً من هذه الأدلة ليس بجديد بقدر ما هو إعادة لتحليل وتفهم معلومات سابقة المعرفة. زد على أن بعض هذه المعلومات قد جمعت أحياناً لدحض فكرة حركية الألواح وليس لدعمها. فقد قال أحد الباحثين: لا تتوافق ملاحظاتي على النيل من إنفراج قاع البحر غير أنني سأعد نقداً كفيلاً بأن يخلصنا من هذه الفكرة الغربية لتتفرغ فيما بعد لأعمالنا المعتادة. ولكن هذا الباحث، شأنه في ذلك شأن الكثير من الآخرين. قد وجد أن نتائجه تنسجم ومفهوم هذه الفكرة وليس العكس. وعموماً فقد كتب لهذه الثورة العلمية أن أخرجت نظرية سادت.

حركية الألواح والزلازل

مع حلول سنة 1968 ترسخت الخطوط العريضة لأساس نظرية حركية الألواح. وفي نفس السنة نشر ثلاثة جيولوجيين من مرصد لامونت دورتي بحثاً يوضح أن نموذج نظرية حركية الألواح الجديد أكثر فاعلية من النماذج السابقة



شكل 16 - 24

العلاقة بين اللوح الهابط وعمق
مراكز الزلازل.

تدريجياً كلما زاد عمقه، غير أن درجة الحرارة داخل النطاق الذي يمر به تبقى منخفضة نسبياً حيث أن مواد باردة يتم وباستمرار اضافتها من أعلى. فقد وجد الباحثون أن مركز مسطح يبلغ سمكه حوالي 100 كيلومتر ويغور بمعدل بضعة سنتيمترات سنوياً سيبقى هشاً حتى عمق 600 و 700 كيلومتر، أي أنه بالامكان حدوث زلازل ذات بؤر عميقة بطريقة مشابهة للزلازل الضحلة بانطلاق طاقة التمدد المخزنة داخل المسطح المتناكس، حيث تقابل مقاومة، لحركة غوصها إلى أسفل.

وبغوص المسطح إلى أعماق أكبر وأكبر داخل النطاق الوهن تحدث الزلازل. وحيث أن هذه الزلازل تحدث داخل الغلاف الصخري المتناكس بدلاً من الجزء الوهن (اللدن)، عليه يمكن تتبعها ورصد حركة الألواح داخل الوشاح (شكل 16 - 24). فقد دلت المعلومات الزلزالية بأن الألواح تبدأ في

تكون أكثر قرباً من الأقواس البركانية. ولم يكن هناك تفسير مقنع قبل نموذج حركية الألواح لظاهرة توزيع البراكين المذكورة أعلاه.

وقد لاقى متخصصو الزلازل مشكلة أخرى تمثلت في صعوبة تحديد ميكانيكية تكوين الزلازل العميقة المركز. تذكر أن تخزين طاقة التمدد ومن ثم إنطلاقها قد اعتمد وقتها كمصدر لطاقة الزلازل الضحلة المركز، غير أنه قد أثبت بأن درجة الحرارة والضغط عند أعماق تتراوح بين 60 و 100 كيلومتر تجعل الصخور تنساب تحت الاجهاد المرتفع، ولا تسلك مسلك الصخور الصلبة الهشة.

وقد أوضح زلزاليو مرصد لامونت - دورتي بأن جميع هذه الاستنتاجات تتسجم وما أتت به نظرية حركية الألواح. ففي نموذج الألواح تتكون الخنادق في مواقع غوص المسطحات المحيطية داخل الوشاح. وترتفع درجة حرارة اللوح الغائر

وهي حدث تقني هائل حيث أنها قادرة على إنزال أنابيب الحفر الى عمق آلاف الأمتار من مياه المحيط ثم الحفر مئات الأمتار خلال الرسوبيات وما تحتها من قشرة بازلتية. وقد جعل ذلك ممكنا تطوير ديناميكية تحديد الموقع والتي استعملت الموجات الصوتية من جهاز صوتي خاص يتم إنزاله الى قاع البحر. وأى تغير في موقع السفينة يتم التنبيه إليه بواسطة حاسوب يعمل على إستقبال الموجات الصوتية ثم يتصرف ذاتيا لتصحيح ذلك عن طريق آلات دفع السفينة الجانبية أو الداسر عند أحد طرفيها. وبهذه الطريقة تستطيع هذه السفينة الثبات فوق نقطة الحفر لمدة طويلة حتى في المياه العميقة جدا وتحت ظروف صعبة من التيارات والأمواج.

وقد بدأت مهمة هذه السفينة في شهر أغسطس من سنة (1968) حيث أمكن بعدها بقليل الحصول على أدلة من جنوب المحيط الأطلسي. فقد تم الحفر عند مواقع عدة خلال رسوبيات القاع حتى صخور القاعدة البازلتية. وقد كان هناك هدف مهم ألا وهو تجميع عينات من الرسوبيات فوق القشرة النارية مباشرة وذلك كأداة لتحديد عمر قاع البحر عند كل موقع (لا يعتمد على تقدير عمر القشرة المحيطية نفسها بواسطة المواد المشعة حيث أن البازلت تتأثر مكوناته تحت تأثير مياه البحر). وحيث أن عملية الترسيب قد بدأت بعد تكون القشرة المحيطية مباشرة فإن المستحاثات التي تجمع من أقدم الرسوبيات عمرا (التي توجد على قاع المحيط مباشرة فوق البازلت) يمكن أن تستعمل لتحديد عمر قاع المحيط بذلك الموقع. وعند توقيع أماكن الحفر نسبة الى بعدها عن مرتفع وسط المحيط وجد أن أعمار الرسوبيات تزداد بازدياد هذه المسافة. وبالطبع فإن هذه النتائج تنسجم وما جاءت به فكرة إنفراج قاع البحر والتي تنبأت بأن أحدث بقع المحيط لا بد وأن تكون عند قمة مرتفع وسط المحيط وأن أقدم أجزاء قاع المحيط بالمقابل تكون بمحاذاة حواف القارات. وبالإضافة الى ذلك فقد وجد أن معدل إنفراج قاع المحيط الذي تم حسابه من المعلومات عن أعمار رسوبيات

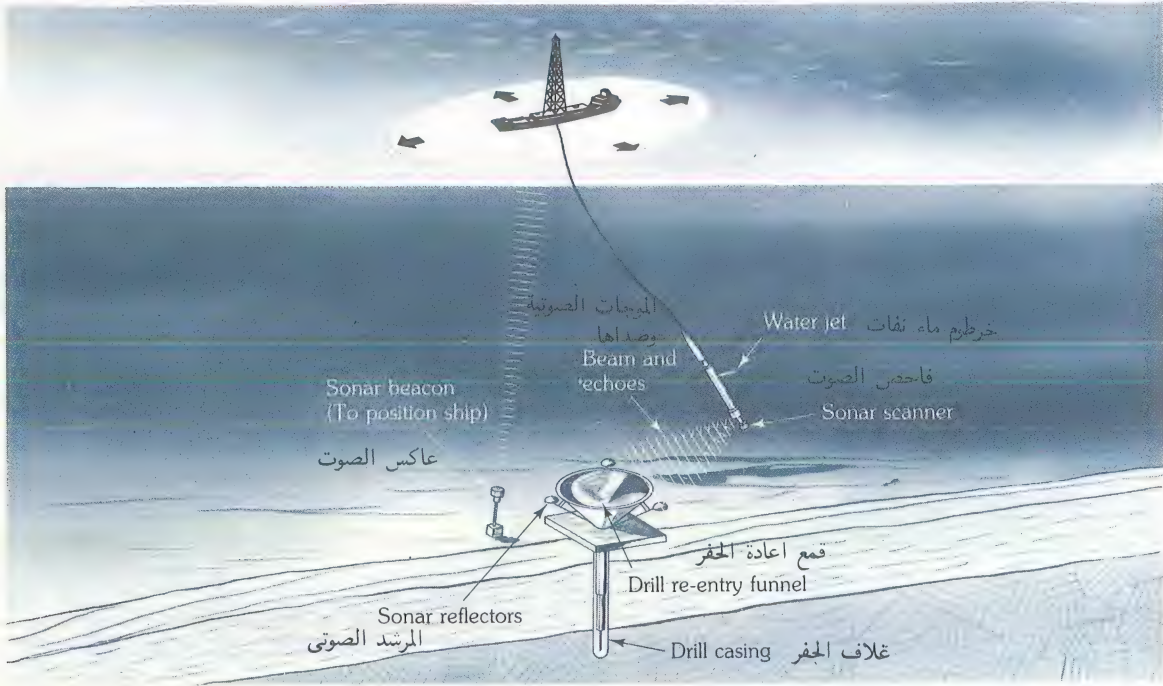
هبوطها بزاوية تبلغ حوالى 45°. تذكر أن هذه النطاقات من النشاط الزلزالي المائل والتي تمتد من الخنادق البحرية الى النطاق الوهن تسمى نطاقات بينيوف، وذلك على إسم العالم الزلزالي الذي قام بدراسات مستفيضة حول توزيع بؤر الزلازل. فقد وجد أن زلازل قليلة جدا يمكن أن تحدث تحت أعماق تزيد على 700 كيلومتر ربما لأن الغلاف الصخري قد يستوعب بالكامل داخل الوشاح عند هذا العمق.

وفي الوقت الذي تحدث فيه الزلازل في الألواح الغائرة فإن زلازل ضحلة أيضا تحدث في الألواح التي تعلوها. ويعتقد بأن هذه الزلازل الضحلة تتكون بفعل الاجهاد الناتج عن مرور المسطحات الغائرة أسفل الألواح التي تعلوها.

ويفسر نموذج حركية الألواح أيضا غياب البراكين العميقة على طول مرتفعات وسط المحيط فبناء على هذا النموذج تقع النطاقات المتباعدة عند أمكنة تخرج عندها باستمرار مواد الوشاح الساخنة. وعليه فإن الطبقات العليا فقط تكون هشة بما فيه الكفاية لحدوث زلازل ضحلة البؤرة. وهذا يفسر ظاهرة حدوث الزلازل الضحلة فقط في هذه المناطق.

أدلة من مشروع الحفر بأعماق البحار

لقد جاءت بعض الأدلة المدعمة لفكرة إنفراج قاع البحر من الحفر خلال رسوبيات قاع المحيط ومصدر هذه المعلومات جاء من مشروع الحفر بأعماق البحار الذي بدأ في أواخر الستينات من هذا القرن تحت إشراف مشترك لعدة مؤسسات متخصصة. وقد كان الهدف الأول (ولا زال) هو جمع المعلومات المباشرة حول عمر وطبيعة تكوين الأحواض المحيطية. فقد شعر العلماء بأن التنبؤات المستمدة من معلومات المغناطيسية القديمة يمكن إثباتها فقط بجمع عينات من قيعان الأحواض المحيطية. ولتحقيق هذا الهدف بُنيت سفينة أبحاث جديدة أسموها المتحدى (شكل 16 - 25)،



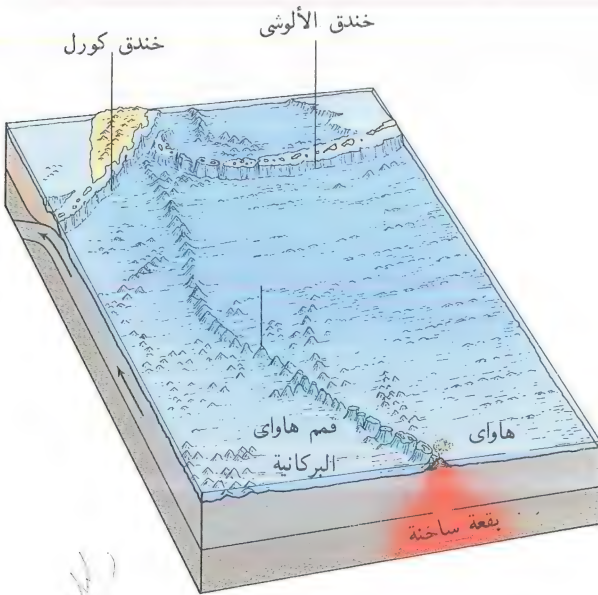
شكل 16 - 25

(أ) - سفينة الأبحاث هذه مجهزة لالتقاط عينات من رسوبيات أعماق بقاع المحيطات. طولها حوالي 120 مترا ومحملتها 100,000 طن. (ب) - بوسط السفينة برج طوله 42 مترا. هذا منظر الى تحت من قرب قمة البرج حوالي 61 مترا فوق خط الماء. (ج) - قدرة السفينة الهائلة. يمكن إيقاف السفينة في أعماق هائلة دون مرسة والمحافظة عليها في وضع الحفر طوال المدة اللازمة لذلك ويرجع ذلك الى أجهزة التحكم بالسفينة التي تحافظ عليها في دائرة قطرها 100 متر. كما يمكن الرجوع وإعادة الحفر في موقع سابق اذا لزم الأمر. وربما يبدو ذلك سهلا لكن تذكر ان قطر البئر لا يزيد على 12 سنتيمترا وهي على بعد قد يبلغ آلاف الأمتار تحت السفينة. وعند إعادة الدخول الى البئر يتم ازالة خيط الحفر مع فاحص الصوت الذي يبعث بإشارات صوتية ترجع اليه من ثلاثة عاكسات مثبتة فوق قمع. كل ذلك يرسل الى السفينة حيث يتم استعمال خرطوم مائي نفثات لتوجيه الناقب فوق القمع مباشرة.

لأحواض المحيطات الترسيبية. وستعمل سفينة الأبحاث هذه في السنوات القادمة أو ربما أخرى أحدث منها على تفهّم أوضح لأصل وتطور أحواض المحيطات.

البقع الساخنة

لقد بينَ تخريط القمم البركانية بالمحيط الهادى وجود سلسلة تركيبية بركانية تمتد من جزر هاواى الى جزيرة مدوى، ثم تستمر شمالا تجاه الخندق الأوليشى. وقد بينَ تحديد العمر باستعمال البوتاسيوم - أرغون من 27 موقعا بركانيا على هذه السلسلة أن عمر الصخور يزيد بزيادة المسافة عن هاواى. فقد وجد أن عمر قمة سويكو البركانية - تقع بالقرب من خندق الأوليشى المحيطى - حوالى 65 مليون سنة بينما يبلغ عمر جزيرة مدوى حوالى 27 مليون سنة، بالإضافة الى أن جزيرة هاواى قد وجد أنها برزت من المحيط منذ أقل من مليون سنة مضت (شكل 16 - 26).



شكل 16 - 26

سلسلة من الجزر و قمم بركانية تمتد من هاواى الى الخندق الألوشى.

القاع ينطبق مع التى سبق وأن تمّ تقديره من الدليل المغناطيسى. وقد دعم بالتالى الحفر فى المحيط الهادى هذه النتائج مما جعل هذه المضاهاة الجيدة حجة دامغة لظاهرة إنفراج قاع البحر.

وقد دُعِمَت كذلك المعلومات المستقاة من مشروع الحفر بأعماق البحار الفكرة القائلة بأن الأحواض الترسيبية المحيطية حديثة العمر جيولوجيا. فلم يتم العثور حتى الوقت الحاضر على رسوبيات يزيد عمرها على 160 مليون سنة فى الوقت الذى يبلغ عمر بعض الصخور القارية حوالى 3.8 بليون سنة.

وقد وجد أيضا أن سمك رسوبيات قاع المحيط هى دليل آخر لفكرة الانفراج، حيث أن عمليات الحفر قد بينت أنه لا توجد تقريبا أية رسوبيات فوق قمم مرتفعات وسط المحيط بينما يزيد سمكها كلما ابتعدنا عن هذه المرتفعات. وحيث أن قمة مرتفع وسط المحيط هى أحدث من المواقع البعيدة عنه فإن هذا التوزيع للرسوبيات متوقع إذا ما صحت فكرة إنفراج قاع البحر. وبالإضافة الى ذلك فقد وجد من القياسات بعرض المحيط أن معدل تراكم الرسوبيات يبلغ حوالى 1 سنتيمتر كل 1000 سنة. وإذا ما كان قاع المحيط قديما حقا فلا بد وأن سمك رسوبياته قد بلغ عدة كيلومترات الآن، غير أنه من خلال الحفر بمئات المواقع حتى الوقت الحاضر لم يتجاوز سمك الرسوبيات مئات الأمتار. إذاً هذا دليل آخر يؤكد بأن قاع المحيط ظاهرة حديثة جيولوجيا.

ولقد قدّم مشروع الحفر بأعماق البحار للباحثين كميات هائلة من المعلومات الأساسية حول تاريخ المحيطات، كما أنه أكد الكثير من أوجه نظرية حركية الألواح. وباختصار لقد أُثبِتَتْ نظرية إنفراج قاع البحر عندما بيّنت عينات لب الآبار لقاع المحيط أن الرسوبيات أقدم عمرا وأكثر سمكا كلما ابتعدنا عن مرتفعات وسط المحيط، بالإضافة الى أن هذه المعلومات قد دُعِمَتْ وبقوة فكرة الحدائة الجيولوجية



شكل 16 - 27

تعيين الاعمار باستعمال المواد
المشعة لجزر هاواي يبين التناقص
في عمر النشاط البركاني تجاه
هاواي.

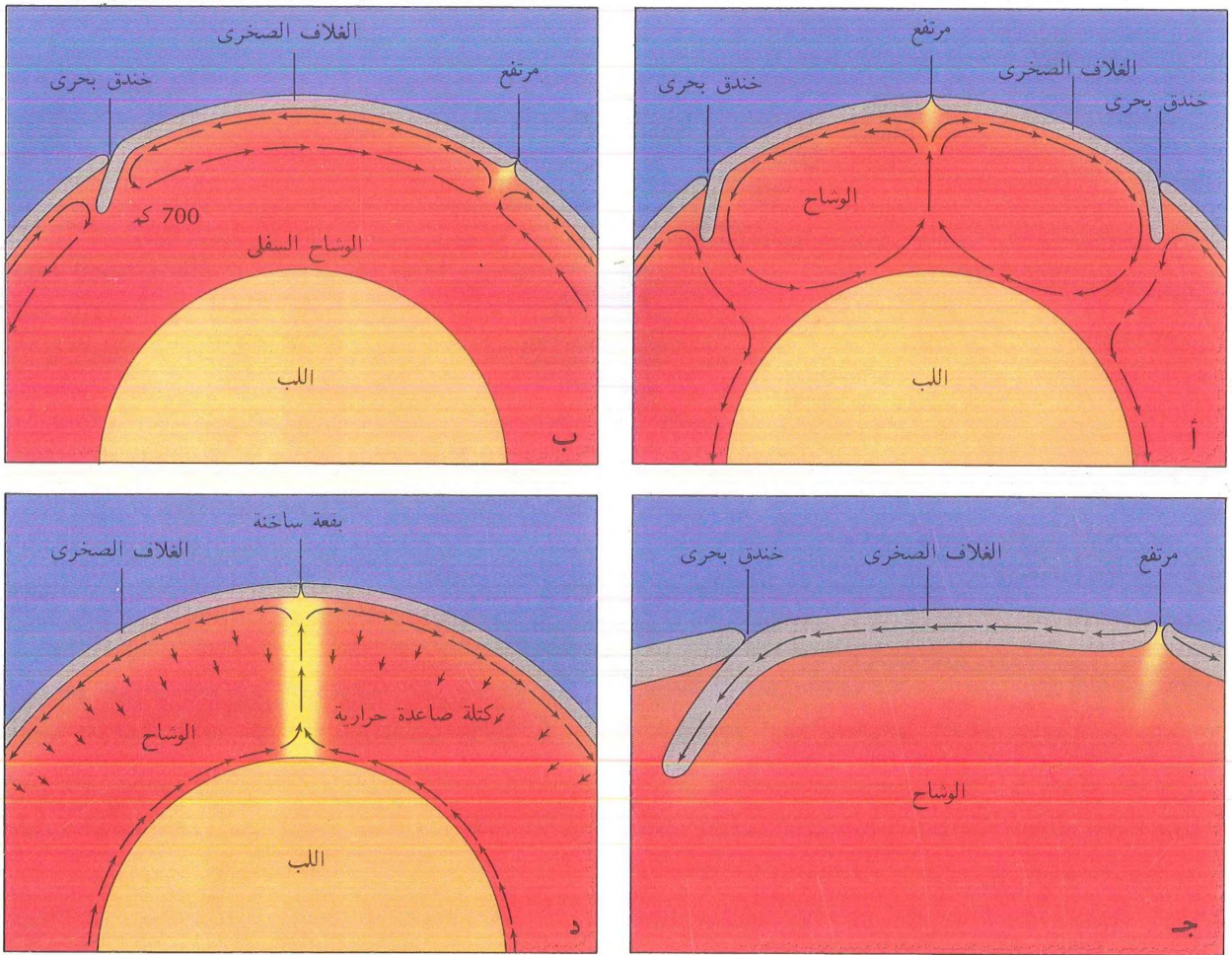
على الدفع الى أعلى بكميات من الصخور المنصهرة التي تسبب في كثير من الأحيان إنفجار البراكين على السطح. وتدل المعلومات على أن معظم البقع الساخنة قابعة في مكانها لا تتحرك غير أن بعضها يبدو أنه قد تحرك قليلا. وقد وجد أن حوالي 20 بقعة ساخنة من مجموع يتراوح بين 50 و 120 تقع بالقرب من حواف لألواح متباعدة بينا الباقي لا علاقة لها بحواف الألواح. ويعتقد بأن هناك بقعة ساخنة تحت أيسلندة مسئولة عن التراكبات الضخمة غير العادية من اللابا بذلك الجزء من مرتفع وسط المحيط الأطلسي، كما يعتقد بوجود بقعة ساخنة تحت منتزه ييلوستون بوسط أمريكا، وربما كانت مسئولة عن طفوح اللابا والرماد البركاني الذي يغطي تلك المنطقة، وإذا ما صح ذلك فلا يستبعد أن تعيد البراكين نشاطها هناك مرة أخرى. وتوجد بقع ساخنة أخرى تحت قيعان البحار نتج عنها عدد من المرتفعات البركانية لها نفس اتجاه حركة الألواح.

الميكانيكية المحركة

لقد تناولت النظرية أعلاه حركة الألواح الى جانب أثر هذه الحركة. أى أن القبول بها لا يعتمد على معرفة القوة أو القوى المحركة للألواح. وهذا من حسن الحظ حيث أنه وإلى حد الآن لم تفى أى من المقترحات المقدمة للميكانيكية المحركة بجميع جوانب حركة الألواح، غير أن التوزيع غير

لقد اقترح الباحثون بأن هناك بقعة ساخنة داخل الوساح تقوم بقذف الصهير فوق قاع البحر الذي يعلوها. ويفترض بأن التراكيب البركانية تبرز على التوالي في الوقت الذي يتحرك فيه اللوح الهادي فوق البقعة الساخنة. ولقد بين عمر كل من هذه البراكين الوقت الذي كان فيه فوق البقعة الساخنة الثابتة الموقع نسبيا. وتعتبر جزيرة كاواي أقدم الجزر الكبيرة في سلسلة جزر هاواي. ولقد كانت كاواي الجزيرة الوحيدة هناك وقت تكوُّنها وذلك منذ خمسة ملايين سنة مضت (شكل 16 - 27). وهناك دليل حول عمر كاواي يمكن مشاهدته بتفحص البراكين الهامدة التي تمت تعريتها وتحولت الى قمم منملدة وأودية فسيحة. وعلى العكس من ذلك فإننا نجد أن المنحدرات الجنوبية لجزيرة هاواي تتكوّن من طفوح اللابا الحديثة. بل إن اثنين من براكينها، المونا لؤا والكيلاوا، لا زالا نشطين حتى الآن. ولقد تبين حديثا بأن هناك ركام بركاني يتكوّن الآن على قاع المحيط بالقرب من شاطئ جزيرة هاواي. وعليه يمكن القول جيولوجيا بأن الوقت لن يطول حتى تبرز جزيرة جديدة لتنضم الى سلسلة تلك المنطقة الاستوائية من الجزر.

وبالرغم من أنه قد ثبت وجود البقع الساخنة إلا أنه لم تنجلي بوضوح حتى الآن طبيعتها الدقيقة ولا دورها في حركية الألواح. فيبدو أن هذه البقع أماكن جدّ ساخنة داخل أعماق وشاح الأرض. فالحرارة العالية والضغط المرتفع تعمل



شكل 16 - 28

نماذج اقترحت للقوة الدافعة لحركية الألواح. (أ) - خلايا لتيارات حمل ضخمة داخل الوشاح تحمل الغلاف الصخري مثل حزام التحويل. (ب) - خلايا لتيارات حمل داخل الجزء الأعلى من الوشاح تعمل على تحريك الألواح. (ج) - نماذج الشد والدفع وهي أيضا نوع من الحمل بحيث يعمل المسطح الغائر المنخفض في حرارته إلى شد قاع البحر من وراء بينما تدفع الجاذبية الجانب الآخر من على قمم مرتفعات وسط المحيط. (د) - نموذج الكتل الساخنة الذي يقول بأن حركة المواد إلى أعلى تقتصر على نطاقات طبقة بينما يحدث الهبوط ببطء خلال كل أجزاء الوشاح.

السفلى الساخنة والقليلة الكثافة نسبة إلى ما فوقها ترتفع بالتدرج عند مرتفعات وسط المحيطات. وعند إنسباط هذه المكونات جانبا تبرد وتصيح أكثر كثافة لتبدأ في الغوص من جديد نحو الوشاح وترتفع درجة حرارتها. لاحظ أنه ليس من الضروري أن تنصهر الصخور لتتساب. وعليه يمكن

المتساوي للحرارة داخل الكرة الأرضية قد قبل به معظم الباحثين على أنه السبب الرئيسي في حركة الألواح. إذ يعتقد كثير من الجيولوجيين بأن إختلاف درجة الحرارة داخل الأرض قد نجمت عنه خلايا من تيارات الحمل الضخمة داخل الوشاح (شكل 16 - 28 أ، ب). فمكونات الوشاح

وتفتقر بعض المحيطات مثل الأطلسي الى نطاقات غور. وعليه فإن ميكانيكية شد المسطح لا تفسر الانفراج عند مرتفعاتها. وعلى إعتبار أن بعض مرتفعات وسط المحيط الأخرى غير شاهقة الارتفاع فإن ذلك يضعف من فاعلية النموذج البديل وهو دفع المسطح. ولكن ربما تكون ظاهرة شد المسطح ودفعه ذات تأثير في بعض تركيبات مرتفعات وسط المحيط بل قد يعملان مجتمعين كقوة دفع لحركة بعض الألواح.

وهناك نموذج آخر لتيارات الحمل الحرارية يقول بأن الكتل الساخنة (البقع الساخنة) الضيقة المجال نسبياً هي التي تعمل على حركة الألواح (شكل 16 - 28 د). ويعتقد بأن هذه الكتل الساخنة تبدأ في التكوّن قرب الحد الفاصل بين لب الأرض ووشاحها. وبوصول هذه الكتل الغلاف الصخري تنتشر جانبياً وتحمل معها الألواح بعيداً عن نطاق خروجها. وعادة ما تكشف هذه الكتل الساخنة عن نفسها على هيئة تراكيب بركانية تنمو فوق قاع المحيط في بعض الأماكن مثل أيسلندة. وقد تمّ التعرف على حوالي 20 بقعة ساخنة على طول مرتفعات وسط المحيطات حيث يمكنها المشاركة في حركة ابتعاد الألواح. تذكّر أن بعض الكتل الساخنة مثل التي كوّنت جزرهاواي لا تقع على مرتفع وسط المحيط، وعليه لا بد لنا أن نخلص الى أن لهذا النموذج محاذيره. وربما كان لكل هذه الظواهر مجتمعة دور في حركة الألواح.

للصخور أن تنساب إذا ما تعرضت لدرجة حرارة وضغط مرتفعين وذلك لمدة طويلة. وقد دلّت القياسات على أن معدل الانسياب الحراري أكبر عند مرتفعات وسط المحيط من باقى أرجائه، وهذا مؤشر جيد على احتمالية وجود نوع من خلايا تيارات الحمل، غير أن الكثير من تفاصيل حركة هذه التيارات بقيت حتى الآن غير واضحة. فكم هناك خلية منها؟ تحت أى عمق تتكوّن؟ وما هو تركيبها؟

وبالرغم من أن التوزيع غير المتساوى للحرارة قد قُبِل كقوة محرّكة للألواح، غير أن الشك لا يزال يخالج الكثير من الجيولوجيين في إمكانية وجود خلايا تيارات حمل بهذا الحجم داخل الوشاح. وبناء عليه لا بد وأن عدداً آخر من المقترحات قد قدم كبديل لميكانيكية حركة الألواح. وأحد هذه المقترحات يقول بأن المسطح المحيطي البارد ذو كثافة أكبر من النطاق الوهن الذي يدعمه. وبناء على هذه الحقيقة فإن اللوح أثناء هبوطه لا بد وأنه يعمل على جرّ الغلاف الصخري من ورائه. وهذا المقترح شبيه بنموذج آخر يقول بأن موقع مرتفعات وسط المحيط المرتفع قد يتسبب في إنزلاق الغلاف الصخري تحت تأثير الجاذبية (شكل 16 - 28 ج). هذه النماذج من الدفع والشد في حد ذاتها نوع من تيارات الحمل. فبدخول طرف اللوح الغائر الوشاح لا بد بأن تتراح مواد الوشاح جانبياً لتنتقل تجاه مرتفعات وسط المحيط وتكتمل الخلية بحركة الصخور المنصهرة الى أعلى من النطاق الوهن ليملاً الفراغ عند الألواح المحيطية المنفرجة.

أسئلة

للمراجعة :

- 1 - ما هو الذى جعل العلماء مثل الفرد واغنر فى البداية يعتقدون بأن القارات كانت فى يوم ما متصلة ببعضها؟
- 2 - ما هى البنجيا؟
- 3 - عدد الدلائل التى جمعها واغنر وزملاؤه لدعم فرضية إنجراف القارات .
- 4 - ما هو الاعتقاد الذى كان سائدا فى أوائل هذا القرن حول كيفية وصول بعض الحيوانات الى قارات أخرى عبر المحيطات؟
- 5 - إشرح باختصار كيف أن القبول حديثا بنظرية حركية الألواح قد وصف بأنه ثورة علمية .
- 6 - كيف يمكن أن يستعمل التجلد بنصف الكرة الجنوبي أثناء أواخر دهر الحياة القديمة فى دعم فرضية الانجراف القارى؟
- 7 - إشرح كيف يمكن للمغناطيسية القديمة أن تستعمل لتحديد موقع مكان ما بالنسبة الى خط الاستواء فى زمن من الأزمنة السابقة .
- 8 - ما المقصود بانفراج قاع البحر؟ لمن يرجع الفضل فى وضع أسس فكرة انفراج قاع البحر؟
- 9 - إشرح كيف ربط فرد فاين ود. ماثيوس بين إنفراج قاع البحر ومعكوس المغناطيسية؟
- 10 - ما هى الأسس التى اعتمد عليها لتحديد حدود الألواح فى البداية ؟
- 11 - أين يتكون الغلاف الصخرى الجديد؟ أين يستهلك؟ لماذا يستلزم تكون الغلاف الصخرى واستهلاكه فى آن واحد؟
- 12 - لماذا يغور الجزء المحيطى من لوح الغلاف الصخرى للأرض بينما لا يحدث ذلك للجزء القارى؟
- 13 - ما مدى امكانية إعتبار الجزر اليابانية مماثلة لتكوّن جبال الأنديز؟ وما الفرق بينهما؟
- 14 - ميز بين فوالق التحويل وبين النوعين الآخرين من حواف الألواح .
- 15 - يتنبأ البعض بأن كاليفورنيا ستغوص فى البحر . هل تنسجم هذه الفكرة ونظرية حركية الألواح؟
- 16 - إذا ما صحت فكرة البقع الساخنة ففى أى اتجاه يتحرك اللوح الهادى عندما

تكونت قمم الأمبراطور البركانية المعزولة؟ (أنظر شكل 16—26) ، وعندما تكونت قمم هاواي البركانية المعزولة؟

17 - ما هو نوع حواف الألواح ذات العلاقة بالأمكان أو الظواهر الآتية (حدد بدقة قدر المستطاع):

الهيمالايا، جزر الألوش، البحر الأحمر، جبال الأنديز، فالق سان أندرياس، أيسلنده، اليابان، قمة سانت هيلنز.

الكلمات الدالة :

rift or rift valley	صدع أو وادي صدعى	divergent boundary	الحواف المتباعدة
plate	لوح	convergent boundary	الحواف المتقاربة
reverse polarity	معكوس القطبية	paleomagnetism	المغناطيسية القديمة
normal polarity	قطبية عادية	continental drift	انجراف القارات
volcanic arc	قوس بركاني	sea floor spreading	انفراج قاع البحر
island arc	قوس جزيري	hot spot	بقعة ساخنة
magnetometer	مغناتومتر - جهاز قياس المغناطيسية	polar wandering	تجول القطبين
subduction zone	نطاق الغوص	transform fault boundary	أطراف فالق التحويل
Curie point	نقطة كوري		